3

INUNDAÇÕES E DRENAGEM URBANA

Carlos E. M. Tucci

3.1 Inundações urbanas

A inundação urbana é uma ocorrência tão antiga quanto as cidades ou qualquer aglomeramento urbano. A inundação ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido a falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, industria, entre outros.

Estes eventos podem ocorrer devido ao comportamento natural dos rios ou ampliados pelo efeito de alteração produzida pelo homem na urbanização pela impermeabilização das superfícies e a canalização dos rios.

Quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, grande parte do volume escoa para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso do volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea inundando de acordo com a topografia das áreas próximas aos rios. Estes eventos ocorrem de forma aleatória em função dos processos climáticos locais e regionais. Este tipo de inundação é denominado neste livro de **inundação ribeirinha**.

Na medida que a população impermeabiliza o solo e acelera o escoamento através de condutos e canais a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem aumenta produzindo inundações mais freqüentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento natural. Esta inundação é **devido a urbanização ou na drenagem urbana**.

Estes dois efeitos podem ocorrer isoladamente ou combinados, mas geralmente as inundações ribeirinhas ocorrem em bacias de grande médio e porte (> 500 km^2) no seu trecho onde a declividade é baixa e a seção de

escoamento pequena, enquanto que as inundações na drenagem urbana ocorrem em pequenas bacias urbanizadas (1 - 100 km2, a exceção são grandes cidades como São Paulo).

Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população no primeiro caso e da impermeabilização e canalização da rede de drenagem no segundo. As inundações ribeirinhas tem sido registradas junto com a história do desenvolvimento humano. As inundações devido a urbanização tem sido mais freqüente neste século, com o aumento significativo da urbanização das cidades e a tendência dos engenheiros de drenarem o escoamento pluvial o mais rápido possível das áreas urbanizadas.

Neste capítulo é apresentado a seguir um histórico sobre as inundações, o gerenciamento das inundações ribeirinhas e devido a drenagem urbana e os princípios do Plano Diretor de Drenagem Urbana.

3.2 Histórico da convivência com a inundação

As inundações são mais antigas que a existência do homem na terra. O homem sempre procurou se localizar perto dos rios para usá-lo como transporte, obter água para seu consumo e mesmo dispor seus dejetos. As áreas próximas aos rios geralmente são planas e propícias para o assentamento humano o que também motivou a sua ocupação.

O desenvolvimento histórico da utilização de áreas livres explica muitos dos antigos condicionamentos urbanos existentes. Devido à grande dificuldade de meios de transporte no passado, utilizava-se o rio como a via principal. As cidades se desenvolveram às margens dos rios ou no litoral. Pela própria experiência dos antigos moradores, a população procurou habitar as zonas mais altas onde o rio dificilmente chegaria. Observa-se que a parcela da população com maior memória sobre os eventos de inundação são os que se localizam em locais com cota mais segura.

Sobre a cidade de Amarna no Egito, que Aquenaton (1340 aC) escolheu para ser uma nova capital foi mencionado " Correndo de leste para oeste, dois leitos secos de rio, *nos quais nada se construiu por medo das enchentes repentinas*, dividiam a cidade em três partes: o centro e os bairros residenciais de norte e do sul. " Brier (1998). Este é um exemplo que a mais de 3000 no passado as pessoas já planejavam a ocupação do espaço de inundação.

A história mostra em diferentes partes do globo que o homem tem procurado conviver com as inundações, desde as mais freqüentes até as mais

raras. Uma experiência histórica é a da igreja católica, pois sempre que ocorre uma inundação numa cidade o prédio da igreja, apesar de ser uma das obras mais antigas, localiza-se em nível seguro.

Hoyt e Langbein (1959) para enfatizar o caráter limitado que tem o homem de controlar as inundações e sua ação é sempre de minimizar seus impactos apresenta um prefácio com uma seqüência histórica reproduzida a seguir:

> " Terra de Canaan, 2957 a C, numa grande inundação, provavelmente centrada cerca do UR no Eufrates, Noé e sua família se salvaram. Um dilúvio resultante de 40 dias e 40 noites de continua precipitação ocorreu na região. Terras ficaram inundadas por 150 dias. Todas as criaturas vivas afogaram com exceção de Noé, sua família e animais, dois a dois, foram salvos numa arca e finalmente descansaram no Monte Ararat" (passagem da bíblia sobre o Dilúvio, citada no referido prefácio). Este texto caracteriza um evento de risco muito baixo de ocorrência.

> "Egito XXIII, Dinastia, 747 a C. Enchentes sucedem secas. Faraó anunciou que todo o vale do rio Nilo foi inundado, templos estão cheios de água e o homem parece planta d'água. Aparentemente os polders não são suficientemente altos ou fortes para confinar as cheias na seção normal. A presente catástrofe descreve bem os caprichos da natureza, outro faraó reclamou que por sete anos o Nilo não subiu. " Este texto que também pode ser encontrado relatos na Bíblia também enfatiza a incapacidade de prever o clima e seus impactos quando ocorrem.

> "Em algum lugar nos Estados Unidos no futuro (o autor mencionava ano 2000, muito distante na época). A natureza toma seu inexorável preço. Cheia de 1000 anos causou indestrutível dano e perdas de vida. Engenheiros e Meteorologistas acreditam que a presente tormenta resultou da combinação de condições meteorológicas e hidrológicas que ocorreriam uma vez em mil anos. Reservatórios, diques e outras obras de controle que provaram efetivas por um século e são efetivas para sua capacidade de projeto são incapazes de controlar os grandes volumes de água envolvidos. *Esta catástrofe traz uma lição que a proteçào contra inundações é relativa e eventualmente a natureza cobra um preço daqueles que ocupam a várzea de inundação*."

Outro exemplo histórico citado por Hoyt e Langbein (1959) foi sobre o rio Pó na Itália. Freeman em 1930 menciona "não existe nenhum projeto mais ambicioso, corajoso e cuidadosamente planejado de regularização de rio em qualquer lugar do mundo do que o do rio Pó". Em Novembro de 1951, excesso de precipitação e altas marés destruíram diques, causando a morte de 100 pessoas, 30.000 vacas e prejuízos de um terço do PIB da Itália da época.

No rio Itajaí em Santa Catarina no Brasil existe uma série de níveis de inundações desde 1852. Deste histórico pode-se observar que as três maiores inundações em Blumenau ocorreram entre 1852 e 1911, sendo a maior em 1880 com 17,10 m. Entre 1911 e 1982 não ocorreu nenhuma inundação com cota superior a 12,90 m, o que fez com que a população perdesse a memória dos eventos críticos e ocupasse o vale de inundação. Em 1983, quando a cidade se encontrava bem desenvolvida com população de cerca de 500 mil habitantes ocorreu uma inundação (a quinta em magnitude dos últimos 150 anos) com cota máxima de 15,34 m. Os prejuízos resultantes em todo o vale do Itajaí representou cerca de 8% do PIB de Santa Catarina. A lição tirada deste exemplo é que a memória sobre as inundações se dissipa com passar do tempo e a população deixa de considerar o risco. Como não há planejamento do espaço de risco, a ocupação ocorre e os prejuízos são significativos. No entanto, a Cia Hering em Blumenau (fundada em 1880, ano da maior inundação) manteve na memória o valor de 17,10m e desenvolveu suas instalações em cota superior a esta. Sem planejamento os relatos históricos são as únicas informações disponíveis para orientar as pessoas.

Fica claro a necessidade do planejamento institucional do espaço de risco. Em Porto Alegre, RS existem níveis de inundação desde 1899, quando se observou vários eventos até 1967. Em 1970 foi construído um dique de proteção para a cidade e desde 1967 não ocorre nenhuma inundação. Nos últimos anos houve um movimento na cidade para a retirada do dique de inundação, considerando que não tinham ocorrido eventos nos últimos 35 anos. Esta falta de conhecimento levou a Câmara de Vereadores a aprovar a derrubada do dique, que felizmente não foi executada pelo município.

O ambiente institucional de controle de inundações não leva a uma solução sustentável. Existem, apenas, poucas ações isoladas de alguns poucos profissionais. Em geral, o atendimento a enchente somente é realizado depois de sua ocorrência. A tendência é que o problema fique no esquecimento após cada ocorrência, retornando na seguinte. Isso se deve a vários fatores, entre os quais estão os seguintes:

- falta de conhecimento sobre controle de enchentes por parte dos planejadores urbanos;
- desorganização, a níveis federal e estadual, sobre gerenciamento de enchentes;
- pouca informação técnica sobre o assunto a nível de graduação na Engenharia;
- o desgaste político para o administrador público, resultante do controle não-estrutural (zoneamento), já que a população está sempre esperando uma obra hidráulica;
- falta de educação da população sobre controle de enchentes;
- não existe interesse na prevenção em alguns países considerando que quando a mesma ocorre é declarada calamidade pública pelo Estado e o município pode receber recursos a fundo perdido. Para o gasto destes valores não é necessário concorrência pública.

Observa-se que os elementos históricos descritos se referem as cenários de *inundações ribeirinhas*. Poucos exemplos históricos (antes dos anos 60) são encontrados para cenários de inundações produzidos pela drenagem urbana ou devido a urbanização. Estes cenários são recentes em função das obras de canalização produzida pelo tipo de desenvolvimento urbano ocorrido depois dos anos 60 na maioria dos países desenvolvidos. Estes mesmos países identificaram já nos anos 70 que este tipo de política era economicamente insustentável, alterando a forma de gerenciar a drenagem urbana para controle não-estrutural e medidas de controle de volume através de detenções urbanas.

Nos países em desenvolvimento isto não ocorreu e até hoje os investimentos são realizados de forma insustentável devido principalmente aos seguintes fatores:

- Falta de conhecimento técnico atualizado dos decisores e engenheiros. Observa-se que grande parte dos profissionais que atuam em drenagem urbana são provenientes da área de água e saneamento que não possuem um conhecimento dos impactos da drenagem urbana na bacia hidrográfica. Geralmente possuem conhecimento tradicional sobre a microdrenagem, que é insustentável;

- Falta de interesse em soluções mais econômicas, como as citadas acima, por parte dos empreiteiros devido aos ganhos econômicos;
- As entidades de financiamento nacional e internacional nem sempre estão atualizadas.

3.3 Conceitos básicos sobre inundações

3.3.1 Sistema de drenagem

Os sistemas de drenagem são definidos *na fonte, microdrenagem e macrodrenagem*. A drenagem *na fonte* é definida pelo escoamento que ocorre no lote, condomínio ou empreendimento individualizado, estacionamentos, parques e passeios.

A *microdrenagem* é definida pelo sistema de condutos pluviais ou canais a nível de loteamento ou de rede primária urbana. Este tipo de sistema de drenagem é projetado para atender à drenagem de precipitações com risco moderado.

A *macrodrenagem* envolve os sistemas coletores de diferentes sistemas de microdrenagem. A macrodrenagem envolve áreas de pelo menos 2 km^2 ou 200 ha. Estes valores não devem ser tomados como absolutos porque a malha urbana pode possuir as mais diferentes configurações. Este tipo de sistema deve ser projetado para acomodar precipitações superiores as da microdrenagem com riscos de acordo com os prejuízos humanos e materiais potenciais.

Um dos pontos que têm caracterizado este tipo de definição tem sido a metodologia de estimativa, já que o Método Racional é utilizado para estimativa de vazões na microdrenagem e os modelos hidrológicos que determinam o hidrograma do escoamento são utilizados na macrodrenagem. As simplificações aceitas para o dimensionamento no método Racional podem ser utilizadas para bacias da ordem de 2km2, que representa a restrição definida acima.

3.3.2 Escoamento e condições de projeto

O escoamento num rio depende de vários fatores que podem ser agregados em dois conjuntos:

Controles de jusante: Os controle de jusante são condicionantes na rede de drenagem que modificam o escoamento a montante. Os controles de

jusante podem ser estrangulamentos do rio devido a pontes, aterros, mudança de seção, reservatórios, oceano. Esses controles reduzem a vazão de um rio independentemente da capacidade local de escoamento;

Controles locais: definem a capacidade de cada seção do rio de transportar uma quantidade de água. A capacidade local de escoamento depende da área da seção, da largura, do perímetro e da rugosidade das paredes. Quanto maior a capacidade de escoamento, menor o nível de água.

Para exemplificar este processo, pode-se usar uma analogia com o tráfego de uma avenida. A capacidade de tráfego de automóveis de uma avenida, numa determinada velocidade, depende da sua largura e número de faixas. Quando o número de automóveis é superior a sua capacidade o tráfego torna-se lento e ocorre congestionamento. Num rio, à medida que chega um volume de água superior a sua vazão normal, o nível sobe e inunda as áreas ribeirinhas. Portanto, o sistema está limitado nesse caso à capacidade local de transporte de água (ou de automóveis).

Considere, por exemplo o caso de uma avenida que tem uma largura com duas faixas num sentido, mas existe um trecho que as duas faixas se transformam em apenas uma. Existe um trecho de transição, antes de chegar na mudança de faixa que reduz a velocidade de todos os carros, criando um congestionamento, não pela capacidade da avenida naquele ponto, mas pelo que ocorre no trecho posterior. Neste caso, a capacidade está limitada pela redução de faixas (que ocorre a jusante) e não pela capacidade local da avenida. Da mesma forma, num rio, se existe uma ponte, aterro ou outra obstrução, a vazão de montante é reduzida pelo represamento de jusante e não pela sua capacidade local. Com a redução da vazão, ocorre aumento dos níveis. Esse efeito é muitas vezes denominado de ***remanso***.

O trecho de transição, que sofre efeito de jusante depende de fatores que variam com o nível, declividade do escoamento e capacidade do escoamento ao longo de todo o trecho.

O escoamento pode ser considerado em regime permanente ou não-permanente. O escoamento permanente é utilizado para projeto, geralmente com as vazões máximas previstas para um determinado sistema hidráulico. O regime *não-permanente*, permite conhecer os níveis e vazões ao longo do rio e no tempo, representando a situação real. Geralmente uma obra hidráulica que depende apenas da vazão máxima é dimensionada para condições de regime permanente e verificada em regime não- permanente.

3.3.3 Risco e incerteza

O risco de uma vazão ou precipitação é entendido neste texto como a probabilidade (p) de ocorrência de um valor igual ou superior num ano qualquer. O tempo de retorno (T) é o inverso da probabilidade p e representa o tempo, *em média*, que este evento tem chance de se repetir.

$$T = \frac{1}{p} \quad (3.1)$$

Para exemplificar, considere um *dado*, que tem seis faces (números 1 a 6). Numa jogada qualquer a probabilidade de sair o número 4 é p=1/6 (1 chance em seis possibilidades). O tempo de retorno é, *em média*, o número de jogadas que o número desejado se repete. Nesse caso, usando a equação 3.1 acima fica T = 1/(1/6)=6. Portanto, **em média**, o número 4 se repete a cada seis jogadas. Sabe-se que esse número não ocorre exatamente a cada seis jogadas, mas se jogarmos milhares de vezes e tirarmos a média, certamente isso ocorrerá. Sendo assim, o número 4 pode ocorrer duas vezes seguidas e passar muitas sem ocorrer, mas na média se repetirá em seis jogadas. Fazendo uma analogia, cada jogada do *dado* é um ano para as enchentes. O tempo de retorno de 10 anos significa que, **em média**, a cheia pode se repetir a cada 10 anos ou em cada ano esta enchente tem 10% de chance de ocorrer.

O risco ou a probabilidade de ocorrência de uma precipitação ou vazão igual ou superior num determinado período de n anos é

$$P_n = 1-(1-p)^n \quad (3.2)$$

Por exemplo, qual a chance da cheia de 10 anos ocorrer nos próximos 5 anos? ou seja deseja-se conhecer qual a probabilidade de ocorrência para um período e não apenas para um ano qualquer. Neste caso,

$$Pn = 1-(1-1/10)^5=0,41 \text{ ou } 41\%$$

A probabilidade ou o tempo de retorno é calculado com base na série histórica observada no local. Para o cálculo da probabilidade, as séries devem ser representativas e homogêneas no tempo. Quando a série é **representativa**, os dados existentes permitem calcular corretamente a probabilidade. Por exemplo, o período de cheia entre 1970 e 1998 no Guaíba em Porto Alegre não é muito representativo, porque ocorreram apenas enchentes pequenas e fora desse período, ocorreram algumas maiores.

A série é **homogênea**, quando as alterações na bacia hidrográfica não produzem mudanças significativas no comportamento da mesma e, em conseqüência, nas estatísticas das vazões do rio.

Em projeto de áreas urbanas, como ocorre alterações *na bacia, o risco utilizado se refere a ocorrência de um determinada precipitação, que admite-se não ser influenciada pela urbanização.* A combinação da ocorrência na precipitação, sua distribuição temporal, condições antecedentes, etc fazem com que o risco da precipitação não seja o mesmo do risco da vazão resultante.

O risco adotado para um projeto define a relação entre os investimentos envolvidos para reduzir a freqüência das inundações e os prejuízos aceitos. Ao se adotar um risco de 10% anualmente, ou tempo de retorno de 10 anos. Aceita-se que em média poderão ocorrer eventos uma vez a cada 10 anos que produzirão prejuízos. A análise adequada envolve um estudo de avaliação econômica e social dos impactos das enchentes para a definição dos riscos. No entanto, esta prática é inviável devido o custo do próprio estudo para pequenas áreas. Desta forma, os riscos usualmente adotados são apresentados na tabela 3.1.

O projetista deve procurar analisar adicionalmente o seguinte:

- Escolher o limite superior do intervalo da tabela quando envolverem grandes riscos de interrupção de tráfego, prejuízos materiais, potencial interferência em obras de infra-estrutura como subestações elétricas, abastecimento de água, armazenamento de produtos danosos quando misturado com água e hospitais;
- Quando existir risco de vida humana deve-se buscar definir um programa de defesa civil e alerta e utilizar o limite de 100 anos para o projeto;
- Avaliar qual será o impacto para eventos superiores ao de projeto e, planejar um sistema de alerta e minimização de prejuízos.

A *incerteza* é a diferença entre as estatísticas da amostra e da população de um conjunto de dados. As incertezas estão presentes nos erros de coleta de dados, na definição de parâmetros, na caracterização de um sistema, nas simplificações dos modelos e no processamento destas informações para definição do projeto de drenagem.

Tabela 3.1 Tempo de retorno para sistemas urbanos

Sistema	Característica	Intervalo	Valor freqüente
Microdrenagem	Residencial	2 – 5	2
	Comercial	2 – 5	5
	Áreas de prédios públicos	2 – 5	5
	Aeroporto	5 – 10	5
	Áreas comerciais e Avenidas	5 – 10	10
Macrodrenagem		10 - 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 - 100	100*

* limite da área de regulamentação

3.4 Inundações ribeirinhas

3.4.1 Características e impactos

As inundações podem ocorrer devido as condições naturais ou geradas por uso do solo como urbanização ou obras hidráulicas. Neste capítulo serão abordadas as inundações naturais e as relacionadas com a existência de barragens para controle ou para outros usos dos Recursos Hídricos.

Quando a precipitação é intensa e a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio é superior à sua capacidade de drenagem, ou seja a da sua calha normal, resultam inundação nas áreas ribeirinhas. Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da freqüência com a qual ocorrem as inundações.

A população de maior poder aquisitivo tende a habitar os locais seguros ao contrário da população carente que ocupa as áreas de alto risco de inundação, provocando problemas sociais que se repetem por ocasião de cada cheia na região. Quando a freqüência das inundações é baixa, a população ganha confiança e despreza o risco, aumentando significativamente o

investimento e a densificação nas áreas inundáveis. Nesta situação as enchente assume características catastróficas.

As áreas hoje desocupadas devido a inundações sofrem considerável pressão para serem ocupadas. A ocupação das áreas urbanas impróprias pode ser evitada através do planejamento do uso dos solos das várzeas, o qual deve ser regulado no Plano Diretor Urbano das cidades.

As condições meteorológica e hidrológica propiciam a ocorrência de inundação. O conhecimento do comportamento meteorológico de longo prazo é muito pequeno devido ao grande número de fatores envolvidos nos fenômenos meteorológicos e à interdependência dos processos físicos a que a atmosfera terrestre está sujeita. As condições hidrológicas que produzem a inundação podem ser naturais ou artificiais. As condições naturais são aquelas cuja ocorrência é propiciada pela bacia em seu estado natural. Algumas dessas condições são: relevo, tipo de precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem.

Os rios normalmente drenam nas suas cabeceiras, áreas com grande declividade produzindo escoamento de alta velocidade. A variação de nível durante a enchente pode ser de vários metros em poucas horas. Quando o relevo é acidentado as áreas mais propícias à ocupação são as planas e mais baixas, justamente aquelas que apresentam alto risco de inundação. A várzea de inundação de um rio cresce significativamente nos seus cursos médio e baixo, onde a declividade se reduz e aumenta a incidência de áreas planas.

As precipitações mais intensas atingem áreas localizadas e são em geral dos tipos convectivo e orográfico. Essas formas de precipitação atuam, em geral, sobre pequenas áreas. A precipitação ocorrida em Porto Alegre, em 13 de fevereiro de 1981, com cerca de 100 mm em 1 hora em toda a bacia do arroio Dilúvio é um exemplo. As precipitações frontais atuam sobre grandes áreas provocando as maiores inundações dos grandes rios.

A cobertura vegetal tem como efeito a interceptação de parte da precipitação que pode gerar escoamento e a proteção do solo contra a erosão. A perda desta cobertura para uso agrícola tem produzido como conseqüência o aumento da freqüência de inundações devido à falta de interceptação da precipitação e ao assoreamento dos rios.

As condições artificiais da bacia são provocadas pela ação do homem. Alguns exemplos são: obras hidráulicas, urbanização (item seguinte), desmatamento, reflorestamento e uso agrícola. A bacia rural possui maior interceptação vegetal, maiores áreas permeáveis (infiltração do solo), menor escoamento na superfície do solo e drenagem mais lenta.

As principais inundações na América do Sul ocorrem nas margens dos grandes rios da América do Sul, como a dos rios da Prata/ Paraná, Amazonas, São Francisco e Tocantins. Na figura 3.1 é possível observar a bacia do rio da Prata com os principais trechos de inundação e as barragens existentes (hidrelétricas). Na bacia do rio Paraguai e no trecho inferior do rio Paraná as inundações são decorrência de prolongados períodos chuvosos que atingem grandes áreas e produzem níveis enchentes durante vários meses. No trecho que envolve a Argentina as áreas são planas e ficam normalmente inundadas por vários meses. Na parte superior do rio Paraná e no rio Uruguai as inundações são rápidas, com duração de apenas alguns dias.

O cenário comum de impacto na América do Sul é decorrência da ocupação da várzea de inundação pela população durante uma seqüência de anos de níveis anuais máximos pequenos. As áreas planas são propícias ao assentamento. Quando retornam os anos com maiores inundações os prejuízos são significativos e a população exige dos governos uma ação no sentido de construir obras de controle como barragens, entre outros. Exemplos deste cenário são apresentados a seguir:

- Na figura 3.2 pode-se observar os níveis de enchentes no rio Iguaçu em União da Vitória. Entre 1959 e 1982 ocorreu apenas uma inundação com risco superior a 5 anos. Este período foi justamente o de maior crescimento econômico e expansão das cidades brasileiras. As enchentes após 1982 produziram prejuízos significativos na comunidade (tabela 3.2);
- No rio Itajaí existem registros iniciando em 1852, com todas os níveis acima no leito menor do rio. Na figura 3.3 pode-se observar também a variabilidade destes níveis e observar que entre 1911 e 1983 não ocorreram níveis acima de 13,04 m (risco de aproximadamente 15 anos), enquanto antes e depois deste período verificou-se vários níveis que chegaram até 17,10 m. Tanto neste caso como no anterior as séries contínuas de registros que iniciaram em 1930 apresentaram tendenciosidade de amostra para avaliação do risco. Neste caso, também os prejuízos foram significativos na bacia do rio Itajaí em 1983 (risco de cerca de 30 anos), os mesmos representaram 8% do PIB do Estado de Santa Catarina da época;
- No alto rio Paraguai existe uma das maiores banhados do mundo, denominado Pantanal. Nesta região sempre houve uma convivência pacífica entre o meio ambiente e a população. Na figura 3.4 pode-se

observar os níveis máximos de enchentes em Ladário desde o início do século. Na tabela 3.3 são apresentados valores do nível máximo médio de inundação e das áreas inundadas do Pantanal em três períodos distintos. Pode-se observar a grande diferença da década de 60 com relação as demais. Neste período houve ocupação dos vales de inundação por períodos longos e não apenas sazonalmente. A população foi desalojada nas décadas seguintes em função do aumento da freqüência dos níveis de inundação. A perda econômica do valor das propriedades e falta de sustentação econômica foi a conseqüência imediata. Esta população passou a viver na periferia das cidades da região em estado de pobreza.

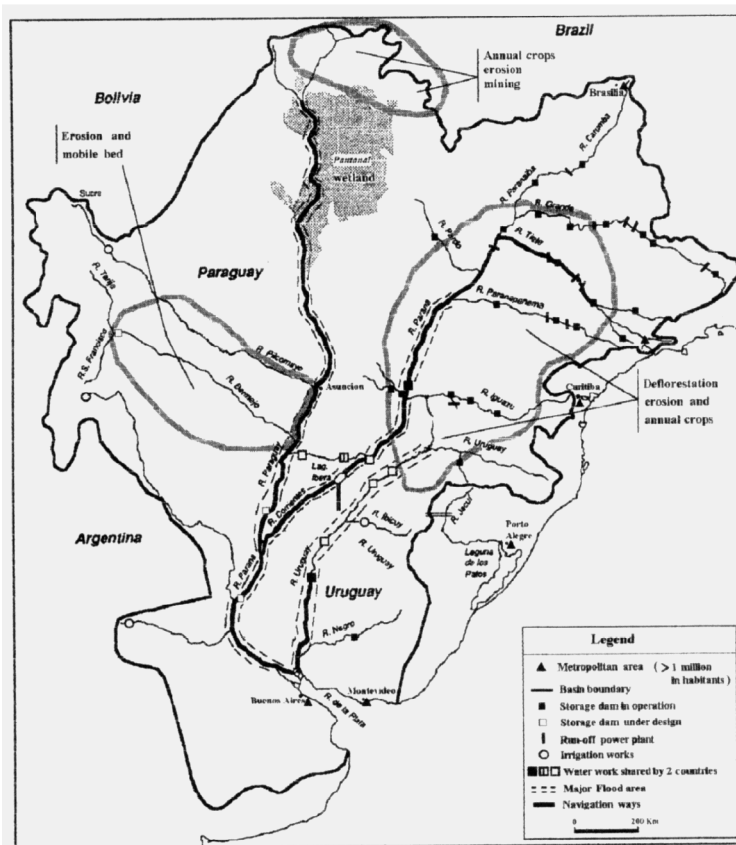



Figura 3.1 Características da bacia do Prata

Tabela 3.2 Perdas por inundações em União da Vitória e Porto União (JICA, 1995)

Ano	Prejuízos US$ milhões
1982	10.365
1983	78.121
1992	54.582
1993	25.933

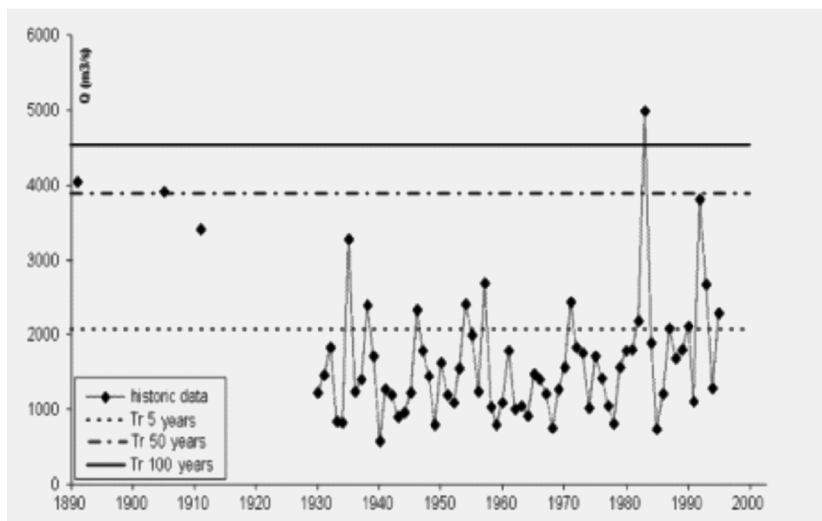



Figura 3.2 Níveis máximos de enchentes no rio Iguaçu em União da Vitória (bacia de cerca de 25.000 km2), (Tucci e Villanueva, 1997)

Tabela 3.3 Valores estimados de níveis e áreas inundadas no Pantanal (valores aproximados)

Período	Nível Máximo Médio m	Área Inundada Média no Pantanal * 1000. Km²
1900-1959	4,16	35
1960 – 1972	2,21	15
1973-1992	5,49	50

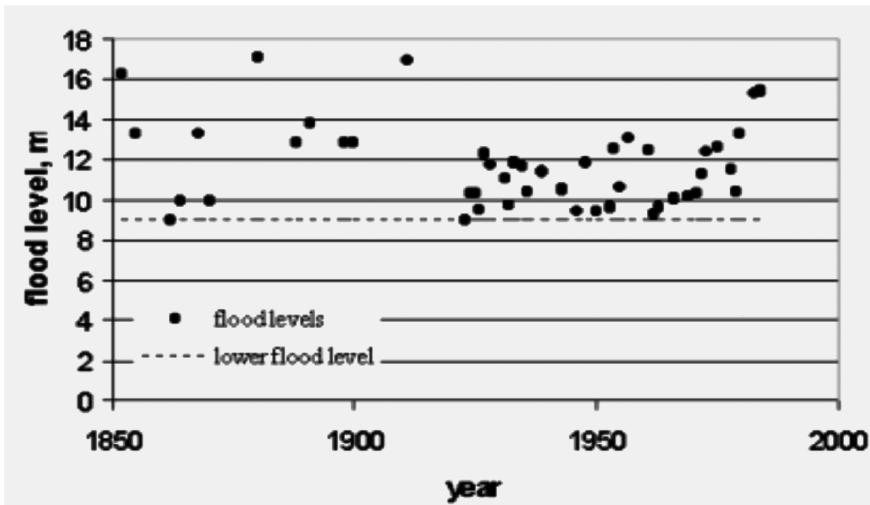



Figura 3.3 Níveis de inundações em Blumenau, S. Catarina, Brasil

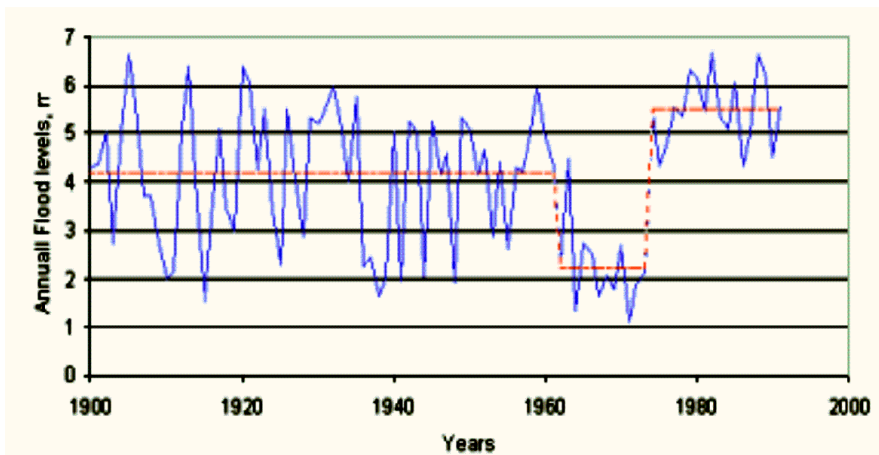



Figura 3.4 Níveis máximos anuais em Ladario no Rio Paraguai e a média dos períodos: (a) 1900-1961; (b)1961-1973; (c)1973-1991

3.4.2 Avaliação das inundações

A variação do nível ou de vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica. As distribuições temporal e espacial da precipitação são as principais condições climatológicas. As mes-

mas somente podem ser previstas deterministicamente com antecedência de poucos dias ou horas, o que não permite a previsão dos níveis de enchente com antecipação muito grande. O tempo máximo possível de previsão da cheia, a partir da ocorrência da precipitação, é limitado pelo tempo médio de deslocamento da água na bacia até a seção de interesse.

A *previsão* dos níveis num rio pode ser realizada a curto ou a longo prazo. A previsão de cheia a curto prazo ou em tempo atual, também chamada de tempo-real, permite estabelecer o nível e seu tempo de ocorrência para a seção de um rio com antecedência que depende da previsão da precipitação e dos deslocamentos da cheia na bacia. Este tipo de previsão é utilizada para alertar a população ribeirinha e operadores de obras hidráulicas. A previsão de cheia a longo prazo é realizada com até nove meses de antecedência.

A *predição* quantifica as chances de ocorrência da inundação em termos estatísticos, sem precisar quando ocorrerá a cheia. A predição se baseia na estatística de ocorrência de níveis no passado e permite estabelecer os níveis de enchente para alguns riscos escolhidos.

Previsão de cheia de curto prazo

Para efetuar a previsão de cheia a curto prazo são necessários: sistemas de coleta e transmissão de dados e metodologia de estimativa. Os sistemas são utilizados para transmitir os dados de precipitação, nível e vazão, durante a ocorrência do evento. O processo de estimativa é realizado através do uso de modelos matemáticos que representam o comportamento das diferentes fases do ciclo hidrológico. Complementarmente é necessário um Plano de Defesa Civil, quando a enchente atinge uma área habitada, ou no caso de operação de reservatório um sistema de emergência e operação.

A previsão de níveis de enchentes pode ser realizada com base em (figura 3.5): (a) previsão da vazão conhecida a precipitação; (b) vazão de montante; (c) combinação dos dois últimos.

No primeiro caso é necessário estimar a precipitação que cairá sobre a bacia através do uso de equipamento como radar ou de sensoriamento remoto. A seguir, conhecida a precipitação sobre a bacia, é possível estimar a vazão e o nível através de modelo matemático que simule a transformação de precipitação em vazão.

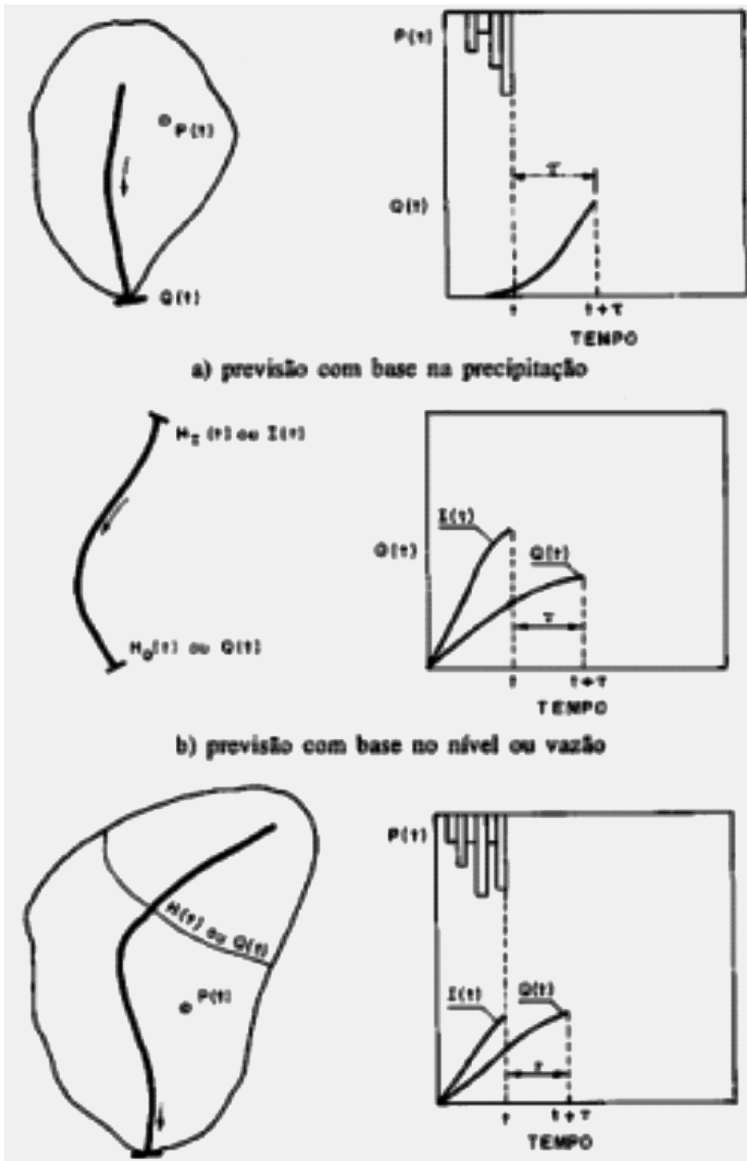



Figura 3.5 Alternativas de previsão de vazão em tempo real

A previsão, quando é conhecida a precipitação na bacia, é realizada com base numa rede telemétrica de coleta e transmissão de dados (no caso anterior esta rede não é dispensável) e o referido modelo matemático de transformação de precipitação em vazão. A antecedência de previsão é menor neste caso e está limitada ao tempo médio de deslocamento da enchente (figura 3.5a). A previsão a curto prazo, com base em posto à montante da seção de interesse, depende das características do rio, ou seja da área controlada da bacia. Neste caso, o tempo de antecedência é menor que os anteriores (figura 3.5b). Quando a bacia intermediária, da situação anterior, apresentar uma contribuição significativa, a combinação dos dois processos anteriores é utilizada na previsão em tempo atual (figura 3.5c). A apresentação dos modelos de previsão em tempo atual foge ao escopo deste livro e pode ser encontrado na literatura especializada (Tucci, 1998).

Predição

As estimativas de inundação de um determinado local pode ser realizada com base em : (a) série observada de vazões; (b) regionalização de vazões; (c) com base na precipitação e uso de modelo precipitação - vazão. Estas metodologias estimam o risco de inundação no local com base nos históricos ocorridos e consideram que as séries históricas de vazões são:

- Homogêneas ou estacionárias, ou seja as suas estatísticas não se alteram com o tempo;
- As séries registradas de níveis de inundação são representativas da ocorrência no local;
- Os valores são independentes entre si.

Os dois primeiros itens apresentam a maior quantidade de incertezas e a utilização de marcas de inundações é essencial para um ajuste confiável da curva de probabilidade de vazões nos locais de interesse. As metodologias para determinação da curva de probabilidade são descritas nos livros de hidrologia (Tucci, 1993).

Na figura 3.6 é apresentado o ajuste as vazões em Apíuna no rio Itajaí - Açu para a série contínua de 1935-1984 e com marcas de inundações de 1852 -1984. Pode-se observar que o ajuste com a série contínua, sem as marcas de inundação é tendencioso para tempo de retorno superior a 20 anos.

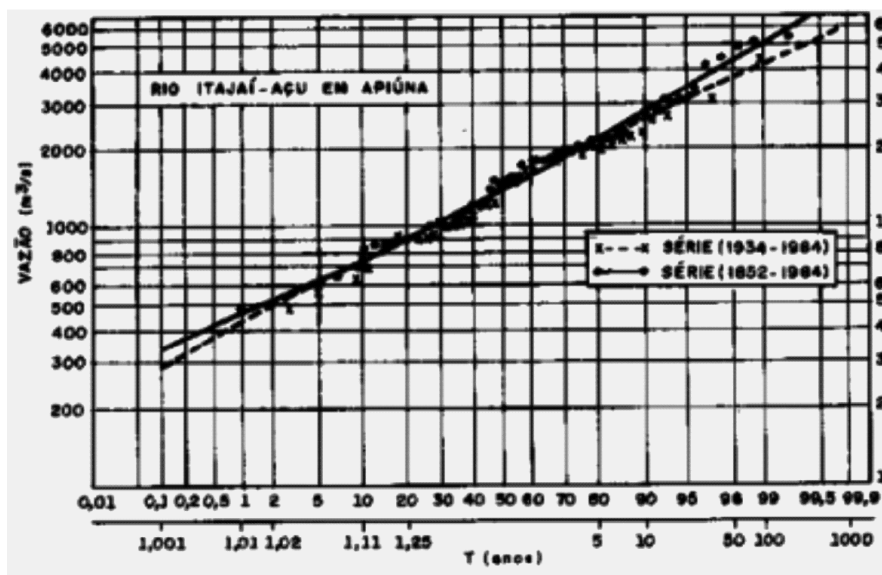



Figura 3.6 Ajuste curva de probabilidade pelo método Log-Pearson III para a séries de vazões continuas e com marcas de inundações em Apiuna no rio Itajaí-Açu (Tucci, 1993)

3.4.3 Medidas de controle

As medidas para o controle da inundacão podem ser do tipo estrutural e não-estrutural. As medidas *estruturais* são aquelas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes, enquanto que as medidas *não-estruturais* são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes. É ingenuidade do homem imaginar que poderá controlar totalmente as inundações; as medidas sempre visam minimizar as suas conseqüências.

O controle da inundação é obtido por um conjunto de medidas estruturais e não-estruturais, permitindo à população ribeirinha minimizar suas perdas e manter uma convivência harmônica com o rio. As ações incluem medidas de engenharia e de cunho social, econômico e administrativo. A pesquisa para a combinação ótima dessas ações constitui o planejamento da proteção contra a inundação ou seus efeitos.

Em 1936, nos Estados Unidos, foi aprovada uma lei em nível federal, sobre controle de enchentes, que identificava a natureza pública dos pro-

gramas de redução de enchentes e caracterizava a implantação de medidas físicas ou estruturais como um meio de reduzir estes danos. Desta forma, não era necessário verificar as relações de custo/benefício para justificar a proteção das áreas sujeitas a inundações. Com isso, acelerou-se o desenvolvimento e ocupação das várzeas, o que resultou em aumento dos danos ocasionados pelas enchentes. As perdas médias anuais, devido às enchentes, aumentaram e a disponibilidade dos fundos públicos foi insuficiente para atender esta tendência. Em 1966, o governo reconheceu que as medidas anteriores não eram adequadas e deu ênfase a medidas não-estruturais, que permitiriam à população conviver com a cheia. O comitê criado pela American Society of Civil Engineers sobre controle de enchentes, relatou, em 1962, o seguinte (Task, 1962): "As limitações da presente (em 1962) Política Nacional de Controle de Enchentes, a qual é baseada principalmente na construção de obras de controle de inundação, são reconhecidas neste relatório, o qual enfatiza a necessidade para a regulamentação das várzeas de inundação como uma parte essencial de um plano racional de redução das perdas das cheias".

Em 1973, foi aprovada uma lei sobre proteção contra desastres de enchentes, dando ênfase a medidas não-estruturais, encorajando e exigindo o seguro para enchentes e regulamentação do uso da terra e proteção das novas construções para enchentes de 100 anos tempo de retorno. Em 1974 foram aprovados, dentro da Legislação de Desenvolvimento de Recursos Hídricos, artigos específicos sobre enchentes que previam medidas não-estruturais e a distribuição de custos, como no artigo 73 da Lei de 1974: "Em pesquisa, planejamento ou projeto de qualquer Agência Federal, ou de qualquer projeto envolvendo a proteção contra inundações, deve ser dada prioridade às alternativas não-estruturais para redução de prejuízos de inundação, incluindo, mas não limitando às construções à prova de enchentes, regulamentação das áreas de inundação; utilização das áreas de inundação para usos recreacionais, pesca, vida animal e outras finalidades públicas e relocação com vistas a formulação da solução economicamente, socialmente e de meio ambiente mais aceitável para redução dos danos de enchentes".

Medidas estruturais

As medidas estruturais são obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes. Essas medidas podem ser extensivas ou intensivas. As medidas extensivas são aquelas que agem na bacia, procurando

modificar as relações entre precipitação e vazão, como a alteração da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. As medidas intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser de três tipos (Simons et al., 1977): a) aceleram o escoamento: construção de diques e *polders*, aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros; b) retardam o escoamento: Reservatórios e as bacias de amortecimento; c) desvio do escoamento, são obras como canais de desvios.

Na tabela 3.4 são resumidas as principais características das medidas estruturais. Algumas dessas medidas são descritas a seguir:

Controle da cobertura vegetal: A cobertura vegetal interfere no processo precipitação-vazão, reduzindo as vazões máximas, devido ao amortecimento do escoamento. Além disso, reduz a erosão do solo que pode aumentar, gradualmente, o nível dos rios e agravar as inundações. O reflorestamento de bacias envolve um custo significativo, o que torna esta medida freqüentemente inviável;

Controle da erosão do solo: o aumento da erosão implica a redução da área de escoamento dos rios e conseqüente aumento de níveis. O controle da erosão do solo pode ser realizado pelo reflorestamento, pequenos reservatórios, estabilização das margens e práticas agrícolas corretas;

Reservatórios: O reservatório retém parte do volume da enchente, reduzindo a vazão natural, procurando manter no rio uma vazão inferior àquela que provocava estravasamento do leito. O volume retido no período de vazões altas é escoado após a redução da vazão natural. O reservatório pode ser utilizado quando existe relevo conveniente a montante da área atingida, mas exige altos custos de construção e desapropriações.

As barragens existentes na América do Sul geralmente foram projetadas para uma das seguintes finalidades: produção de energia, abastecimento de água, irrigação e navegação. São raros os empreendimento voltados apenas para o controle de enchentes na região.

A bacia do rio Itajaí-Açu em Santa Catarina no Brasil é um exemplo de bacia de médio porte (cerca de 12.000 km^2) onde existem três barragens construídas com o único objetivo de controle de enchentes.

Tabela 3.4.Medidas estruturais (Simons et al. 1977)

Medida	Vantagem	Desvantagem	Aplicação
Medidas extensivas:			
Cobertura vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de perda	Reduz assoreamento	Idem ao anterior	Pequenas bacias
Medidas intensivas:			
Diques e polders	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes rios
Melhoria do canal			
Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
Reservatório:			
Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícel	Bacias intermediárias
Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
Reservatórios para cheias	Operação com mínimo de pedras	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
Mudança de canal:			
Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia	Grandes Bacias
Desvios	Reduz vazão do canal principal	Idem ao anterior	Bacias médias e grandes

A construção de barragens de médio e grande porte na América do Sul esteve sempre associada a produção de energia elétrica. Os aproveitamento hidrelétricos geralmente possuem volume significativo e estão localizados a jusante de bacias de grande porte (> 2.000 km^2).

Como a energia de um empreendimento depende da vazão e da queda de água, quanto maior for a vazão regularizada pelo reservatório e a queda gerada pela barragem, maior será a energia gerada. Desta forma, o volume e a bacia devem possuir características que viabilizem economicamente o empreendimento.

As pequenas barragens geralmente tem sido construídas para irrigação ou abastecimento de água, mas são de pequeno volume e, em bacias com área inferior a 1.000 km^2. Estas barragens dificilmente podem interferir de forma eficiente no controle de enchentes. As barragens de navegação apenas mantém o nível de água e possuem também um volume insignificante para controle de enchentes.

Potenciais impactos: As barragens projetadas devem considerar os impactos que podem produzir para jusante e a montante do empreendimento.

Jusante: Geralmente a jusante de uma barragem existem áreas sujeitas a inundação. Com a construção da barragem a tendência é de que o reservatório produza amortecimento das enchentes nestas áreas ribeirinhas, se não houver problemas operacionais da barragem. No entanto, se a área a jusante não estiver ocupada, acaba sendo habitada pela proximidade do empreendimento e passa então estar sujeita as enchentes. Se o empreendimento não amortecer as enchentes, a tendência é que seja cobrado a reduzir os impactos a jusante pela sociedade. Desta forma, a restrição de jusante passa a ser a vazão máxima Ql á partir do qual o rio inunda a sua margem. Nos períodos de enchentes existirão eventos em que a barragem não terá condições de amortecer a vazão e ocorrerá inundações. A percepção pública desta situação, geralmente é de culpar a barragem pelo ocorrido, portanto é necessário que o empreendimento tenha um eficiente sistema operacional e observação confiável dos dados hidrológicos necessários a demonstração das condições operacional para a defesa de suas ações.

Montante: A construção de um reservatório pode produzir os seguintes impactos para montante:

(a) de acordo com a vazão afluente, a regra operacional e a capacidade de escoamento, a linha de água de remanso pode inundar ou provocar represamentos para montante;
(b) as condições do item anterior podem ser alterar com o tempo devido ao assoreamento do reservatório, que ocorre inicialmente no seu trecho mais a montante. Devido a isto os níveis de inundação anteriormente projetados podem aumentar, atingindo áreas fora do limite desapropriado.

Barragem para controle de inundação : O reservatório de controle de enchentes funciona retendo o volume do hidrograma durante as enchentes, reduzindo o pico e o impacto a jusante do barramento. Na figura 3.7 observa-se o hidrograma natural de um rio. Considerando um volume V do hidrograma capaz de ser retido por um reservatório, pode-se observar a redução da vazão máxima e o hidrograma resultante.

Um reservatório sem controle de operação é aquele que não dispõe de comportas de vertedor ou de fundo e a cheia é regulada pelas condições do vertedor livre. Quando existem comportas é possível utilizar com mais eficiência o volume disponível para controle da enchente. No período chuvoso os primeiros hidrogramas tendem a ser de menor porte até que as perdas sejam atendidas e o solo saturado. Estes hidrogramas podem ocupar o volume disponível no reservatório, resultando pouco espaço para reduzir o pico das cheias maiores subseqüentes (figura 3.8a).

A regra operacional pode ser a seguinte: (a) o reservatório deve procurar operar de tal forma a escoar a vazão natural até que a jusante sejam atingidas as cotas limites (Qcrit); (b) a partir deste momento utilize o volume do reservatório para manter ou reduzir a vazão (figura 3.8b). Estas condições operacionais dependem do projeto do reservatório e de seus órgãos extravasores.

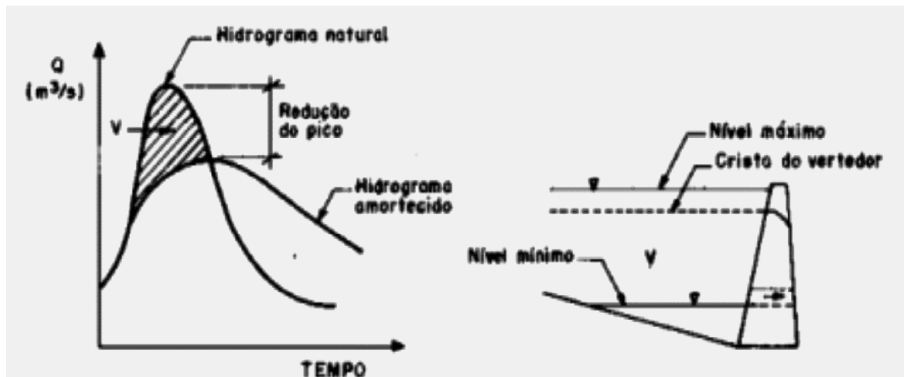



Figura 3.7 Efeito do Reservatório

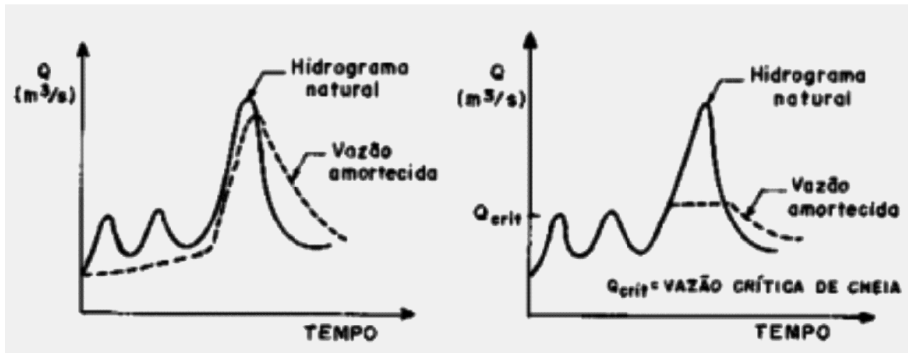
Para a busca das melhores condições de projeto e operação é necessário simular o escoamento no reservatório, identificando qual é a operação mais eficiente.

(a) sem controle (b) com controle

Figura 3.8 Operação do reservatório

Um exemplo de sistema de barragens para o controle de enchentes são os da bacia do rio Itajaí-Açu em Santa Catarina, Brasil (figura 3.9). A barragem Oeste localizada no rio Itajaí-Oeste a montante da cidade de Taió (concluída em 1973) Barragem Sul no Itajaí do Sul (concluída em 1975) a montante da cidade de Ituporanga; a barragem de Ibirama no rio Rio Hercílio (concluída no final dos anos 80). Esta última não existia durante as enchentes de 1983 e 1984. O projeto destas barragens utiliza descarregadores de fundo com capacidade que tende a reter muito volume dentro dos reservatórios, utilizando um tempo muito longo para esvaziamento. A contribuição das duas primeiras barragens para controle da inundação de 1983 foi insignificante devido ao grande volume de precipitação que ocorreu durante 7 dias. No caso da inundação de 1984, que teve uma duração de apenas 2 dias, a contribuição foi maior. Examinando as séries de vazões máximas antes e depois da construção das barragens observou-se um resultado inesperado que foi o aumento da média e desvio padrão das enchentes para uma das seções a jusante de uma das barragens. No entanto, o resultado deste aumento foi devido também aumento de precipitações na bacia justamente entre os dois períodos. Na tabela 3.5 são apresentadas algumas estatísticas desta comparação. A barragem Oeste que não produziu aumento se mostrou mais eficiente na contenção das inundações, enquanto que a barragem Sul aparentemente não possui volume e projeto adequado para redução significativa das inundações.

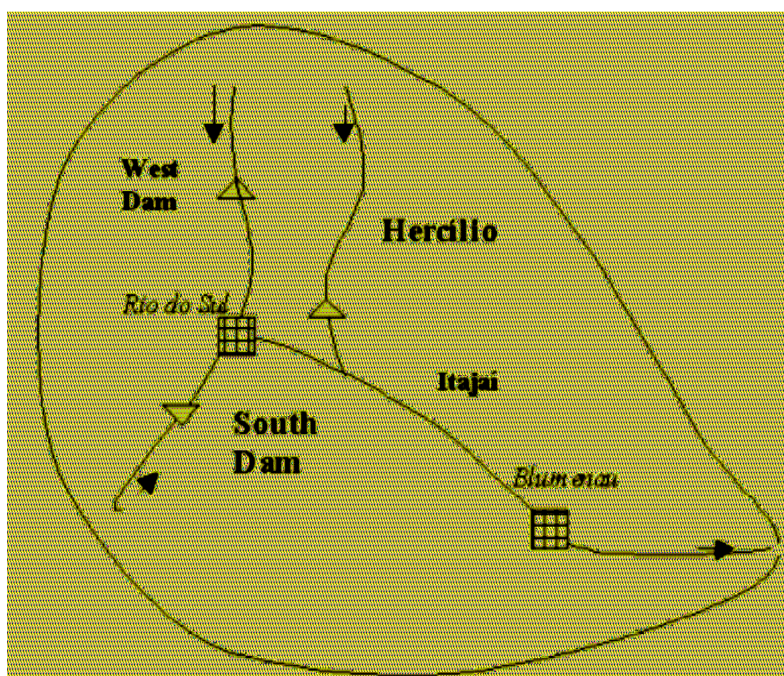



Figura 3.9 Bacia do rio Itajaí e barragens de controle de cheias

Tabela 3.5 Estatísticas antes e depois da construção da barragem no rio Itajaí

Estatística	Barragem Oeste m^3/s	Barragem Sul m^3/s	Precipitação Anual mm	Precipitação[1)] mm
Média				
Antes da barragem	292,2	488,5	1309	224,1
Depois da barragem	274,5	513,3	1658	291,7
Desvio padrão				
Antes	73,2	267,1		
Depois	56,2	356,6		
Período				
Antes	1934-1972	1935-1974	1942-1972	1942-1972
Depois	1973-1983	1975-1984	1973-1984	1973-1984

(1) precipitação do mês no qual ocorre a cheia máxima anual

Barragens com uso múltiplo : Quando existe uma barragem projetada para abastecimento de água, irrigação ou energia elétrica, geralmente o objetivo é manter o volume do reservatório o mais alto possível. Nestas condições a capacidade de amortecer as inundações é mínima Existe um conflito natural entre estes usos.

A metodologia geralmente utilizada para atender aos objetivos conflitantes se baseia na reserva de um volume de espera no reservatório que minimize os impactos da inundação a montante e a jusante da barragem (figura 3.10). Este volume é mantido livre para receber os volumes de inundação e reduzir a vazão para jusante, procurando atender as restrições de montante e jusante.

Existem várias metodologias para estimativa deste volume com base nas estatísticas das séries históricas de vazão da barragem. Os métodos utilizados no setor elétrico brasileiro tem sido o Método da Curva Volume x duração (adaptações da metodologia apresentada por Beard, 1963) ou o método das trajetórias críticas (Kelman et al, 1983). O primeiro utiliza a série histórica observada e o segundo utiliza séries de vazões geradas por modelo estocástico. Os dois métodos determinam estatisticamente o volume de espera que deve ser mantido em cada dia do período chuvoso pelo reservatório para um determinado risco de análise.

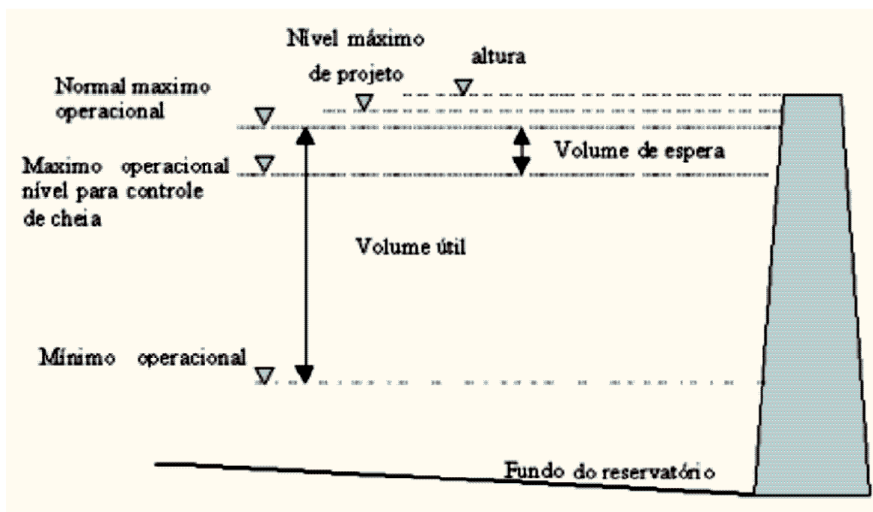



Figura 3.10 Níveis operacionais de uma barragem

Estes procedimentos não consideram a informação existente na bacia no período da inundação. Para bacias onde a sazonalidade não é bem definida o modelo pode subestimar ou superestimar o volume de espera com prejuízos importantes. De um lado os prejuízos devido a inundação e de outro pela perda de energia gerada.

Diques ou polders: São muros laterais de terra ou concreto, inclinados ou retos, construídos a uma certa distância das margens, que protegem as áreas ribeirinhas contra o extravasamento. Os efeitos de redução da largura do escoamento, confinando o fluxo, são o aumento do nível de água na seção para a mesma vazão, aumento da velocidade e erosão das margens e da seção e redução do tempo de viagem da onda de cheia, agravando a situação de outras seções a jusante. O maior risco existente na construção de um dique é a definição correta da enchente máxima provável, pois existirá sempre um risco de colapso, quando os danos serão piores se o mesmo não existisse.

O dique permite proteção localizada para uma região ribeirinha. Deve-se evitar diques de grandes alturas, pois existe sempre o risco de rompimento para uma enchente maior do que a de projeto.

Hidraulicamente o dique reduz a seção de escoamento e pode provocar aumento da velocidade e dos níveis de inundação (figura 3.11). Para que isso não ocorra as condições de fluxo não devem-se alterar após a construção do dique. Estas condições podem ser simuladas em condição de regime permanente para as vazões de projeto. Esta metodologia não deve ser usada para escoamento sujeito ao efeito de maré, pois resultará numa cota superdimensionada. Para tanto deve-se utilizar um modelo hidrodinâmico.

Os diques são normalmente construídos de terra com enrocamento e de concreto, dependendo das condições locais.

Na construção de diques para a proteção de áreas agrícolas, o risco de colapso adotado pode ser mais alto que em áreas urbanas, sempre que os danos potenciais sejam somente econômicos. Quando o colapso pode produzir danos humanos o risco deve ser menor e a obra complementada por um sistema de previsão e alerta em tempo atual. Tanto em bacias rurais como urbanas é necessário planejar o bombeamento das áreas laterais contribuintes ao dique, caso contrário, chuvas sobre estas bacias laterais ficam represadas pela maior cota do rio principal ou acumuladas no seu interior, se não existirem drenos com comportas (figura 3.12).

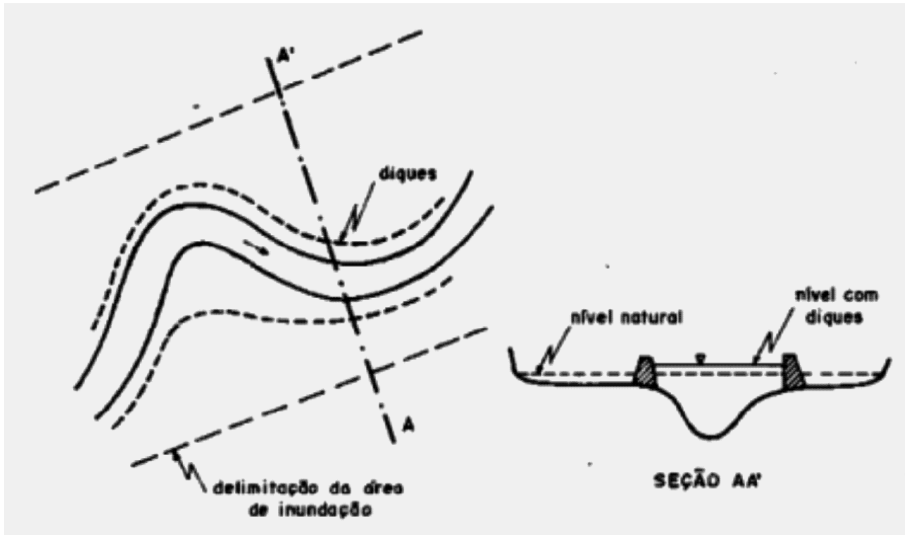



Figura 3.11. Impacto da construção do dique

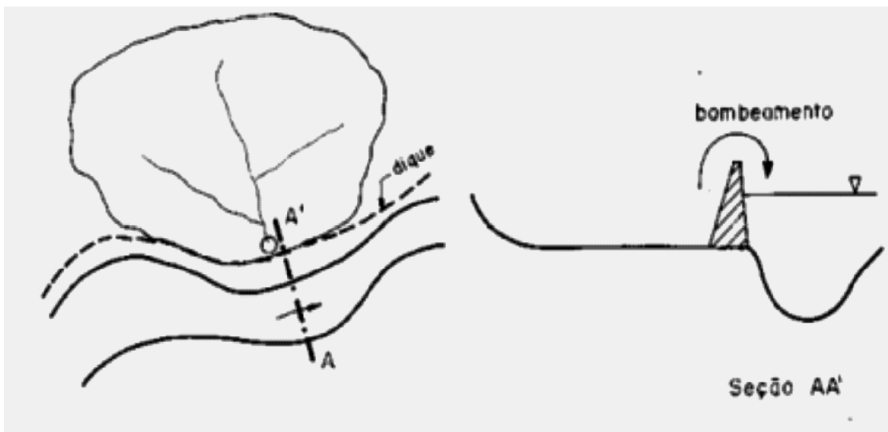



Figura 3.12. Dique - Drenagem da bacia lateral

Modificações do rio: As modificações na morfologia do rio visam aumentar a vazão para um mesmo nível, reduzindo a sua freqüência de ocorrência. Isto pode ser obtido pelo aumento da seção transversal ou pelo aumento da velocidade. Para aumentar a velocidade é necessário reduzir a rugosidade, tirando obstruções ao escoamento, dragando o rio, aumentando a declividade pelo corte de meandros ou aprofundando o rio. Essas medidas, em geral, apresentam custos elevados.

Para a seção de um rio que escoa uma vazão Q, a cota resultante depende da área da seção, da rugosidade, raio hidráulico e da declividade. Para reduzir a cota devido a uma vazão pode-se atuar sobre as variáveis mencionadas. Para que a modificação seja efetiva é necessário modificar estas condições para o trecho que atua hidraulicamente sobre a área de interesse. Aprofundando o canal, a linha de água é rebaixada evitando inundação, mas as obras poderão envolver um trecho muito extenso para ser efetiva, o que aumenta o custo (figura 3.13a). A ampliação da seção de medição produz redução da declividade da linha de água e redução de níveis para montante (figura 3.13b). Estas obras devem ser examinadas quanto à alteração que podem provocar na energia do rio e na estabilidade do leito. Os trechos de montante e jusante das obras podem sofrer sedimentação ou erosão de acordo com alteração produzida.

Medidas não-estruturais

As medidas estruturais não são projetadas para dar uma proteção completa. Isto exigiria a proteção contra a maior enchente possível. Esta proteção é fisicamente e economicamente inviável na maioria das situações. A medida estrutural pode criar uma falsa sensação de segurança, permitindo a ampliação da ocupação das áreas inundáveis, que futuramente podem resultar em danos significativos. As medidas não-estruturais, em conjunto com as anteriores ou sem essas, podem minimizar significativamente os prejuízos com um custo menor. O custo de proteção de uma área inundável por medidas estruturais, em geral, é superior ao de medidas não-estruturais. Em Denver (Estados Unidos), em 1972, o custo de proteção por medidas estruturais de um quarto da área era equivalente ao de medidas não-estruturais para proteger os restantes três quartos da área inundável.

As medidas não-estruturais de inundação podem ser agrupadas em: zoneamento de áreas de inundação através de regulamentação do uso da terra, construções à prova de enchentes, seguro de enchente, previsão e alerta de inundação.

Johnson (1978) identificou diferentes medidas não-estruturais que podem ser inseridas na classificação anterior: instalação de vedação temporária ou permanente nas aberturas das estruturas, elevação de estruturas existentes, construção de novas estruturas sob pilotis, construção de pequenas paredes ou diques circundando a estrutura, relocação ou proteção de artigos que possam ser danificados dentro da estrutura existente, relocação de estruturas para fora da área de inundação, uso de material resistente à água ou novas estruturas, regulamentação da ocupação da área de inundação por cercamento, regulamentação de subdivisão e código de construção, compra de áreas de inundação, seguro de inundação, instalação de serviço de previsão e de alerta de enchente com plano de evacuação, adoção de incentivos fiscais para um uso prudente da área de inundação; instalação de avisos de alerta na área e adoção de políticas de desenvolvimento.

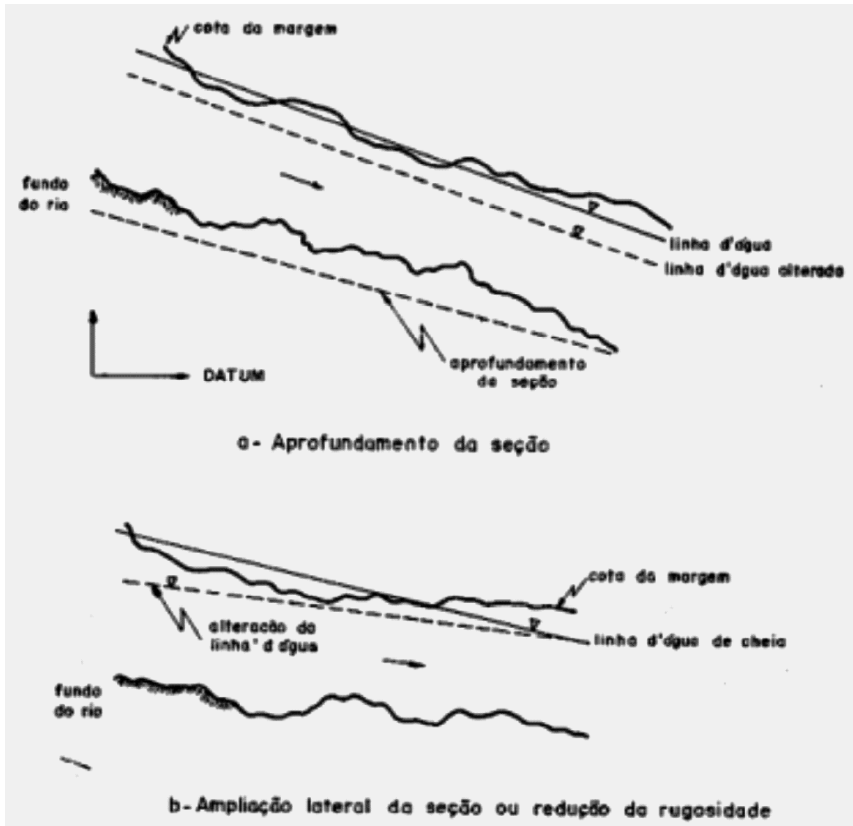



Figura 3.13 Modificações no rio

Construção à prova de enchente: é definida como o conjunto de medidas projetadas para reduzir as perdas de prédios localizados nas várzeas de inundação durante a ocorrência das cheias.

Seguro de enchente permite aos indivíduos ou empresas a obtenção de uma proteção econômica para as perdas decorrentes dos eventos de inundação.

Previsão e alerta: é um sistema composto de aquisição de dados em tempo real, transmissão de informação para um centro de análise, previsão em tempo atual com modelo matemático, e Plano de Defesa Civil que envolve todas as ações individuais ou de comunidade para reduzir as perdas durante as enchentes.

A combinação destas medidas permite reduzir os impactos das cheias e melhorar o planejamento da ocupação da várzea. Como o Zoneamento de inundação pressupõe a ocupação com risco, torna-se necessário que exista um sistema de alerta para avisar a população sobre os riscos durante a enchente. O seguro e a proteção individual contra enchente são medidas complementares, necessárias para minimizar impactos sobre a economia da população.

O controle de enchentes através de zoneamento ou com a existência de diques ***exige a previsão em tempo real dos níveis para a cidade***.

Um sistema de alerta de previsão tempo real envolve os seguintes aspectos:

- sistema de coleta e transmissão de informações;
- sistema de processamento de informações;
- modelo de previsão de vazões e níveis;
- procedimentos para acompanhamento e transferência de informações para a Defesa Civil e Sociedade;
- planejamento das situações de emergência através Defesa Civil.

Os três primeiros itens envolve o estabelecimento de procedimentos técnicos específicos e a modelagem do local de interesse. Normalmente estas atividades são desenvolvidas por entidades que operam a rede de alerta estadual.

Os dois itens seguintes envolvem a transferência dos níveis para população através de diferentes condições que podem ser as seguintes:

1. ***nível de acompanhamento:*** nível a partir do qual, existe um acompanhamento por parte dos técnicos, da evolução da enchente. Nesse momento, é alertada a Defesa Civil da eventualidade da chegada de uma enchente. Inicia-se nesse momento a previsão de níveis em tempo real;
2. ***nível de alerta:*** quando é atingida a cota inferior a que produz prejuízos.Com base nesta cota existe forte probabilidade de ocorrer inundações. A Defesa Civil e administrações municipais passam a receber regularmente as previsões para a cidade;
3. ***nível de emergência:*** quando é previsto que dentro do tempo de previsão será atingida a cota que produz prejuízos. A população passa a receber as informações. Essas informações são o nível atual e previsto com antecedência e o intervalo provável dos erros, obtidos dos modelos;

As ações de planejamento envolvem:

Emergência: A sociedade local, através da Prefeitura deve organizar a Defesa Civil para os atendimentos de emergência. Esse planejamento deve estabelecer procedimentos de evacuação e convivência com a inundação para diferentes partes da cidade, de acordo com faixas de cotas.

O mapa de alerta é preparado com valores de cotas em cada esquina da área de risco. Com base na cota absoluta das esquinas, deve-se transformar esse valor na cota referente a régua. Isto significa que, quando um determinado valor de nível de água estiver ocorrendo na régua, a população saberá quanto falta para inundar cada esquina. Isto auxilia a convivência com a inundação durante a sua ocorrência.

Para que este mapa possa ser determinado, é necessário obter todas as cotas de cada esquina e realizar o seguinte:

1. Para cada cota de esquina, trace uma perpendicular do seu ponto de localização com relação ao eixo do rio .
2. Considere a cota da referida esquina como sendo a mesma nesta seção do rio;
3. Obtenha a declividade da linha de água. Escolha o tempo de retorno aproximadamente pela faixa (mapa de planejamento) em que se encontra a esquina;
4. A cota da régua da esquina será

$$CR = CT + DxDist$$

onde CR é cota da régua; CT é a cota topográfica da esquina; D é declividade ao longo do rio; Dist é a distância ao longo do rio entre a seção da régua. O sinal será negativo se a esquina estiver a montante da seção da régua, enquanto que será positivo se estiver a jusante. O valor a ser colocado no mapa é CR. No entanto, caso a população esteja mais acostumada com o valor da régua e não da sua cota absoluta deve-se utilizar o nível da régua, que é

$$NR=CR-ZR$$

onde NR é o nível da régua; CR é a cota da régua e ZR é a cota do zero da régua.

Zoneamento de áreas de Inundação : A regulamentação do uso da terra ou zoneamento de áreas inundáveis. Portanto, envolve definição da ocupação das áreas de risco na várzea. No seu desenvolvimento é necessário estabelecer o risco de inundação das diferentes cotas das áreas ribeirinhas. Nas áreas de maior risco não é permitida a habitação e pode ser utilizada para recreação desde que o investimento seja baixo e não se danifique, como parques e campos de esportes. Para cotas com menos riscos são permitidas construções com precauções especiais. Além disso, são efetuadas recomendações quanto aos sistemas de esgoto cloacal, pluvial e viário. Esta regulamentação deve ficar contida dentro do Plano Diretor da cidade.

O zoneamento das áreas de inundação engloba as seguintes etapas: (a) determinação do risco das enchentes; (b) mapeamento das áreas de inundação; c) levantamento da ocupação da população na área de risco ; (d) definição da ocupação ou zoneamento das áreas de risco.

Mapa de inundação da cidade : Os mapas de inundação podem ser de dois tipos: mapas de planejamento e mapas de alerta. O mapa de planejamento define as áreas atingidas por cheias de tempos de retorno escolhidos. O mapa de alerta informa em cada esquina ou ponto de controle, o nível da régua no qual inicia a inundação. Este mapa permite o acompanhamento *da evolução da enchente, com base nas observações da régua, pelos moradores nos diferentes locais da cidade. Essa informação normalmente é transmitida através dos meios de comunicação disponíveis (veja metodologia acima).*

Para a elaboração desses mapas são necessários os seguintes dados:

(a) nivelamento da régua a um zero absoluto;
(b) topografia da cidade no mesmo referencial absoluto da régua linimétrica. Cota da rua no meio de cada esquina das áreas de risco;
(c) estudo de probabilidade de inundações de níveis para uma seção na proximidade da cidade;
(d) níveis de enchentes, ou marcas ao longo da cidade que permita a definição da linha de água;
(e) seções batimétricas ao longo do rio no perímetro urbano. Caso a localização da seção de observação se encontre fora do perímetro urbano, a batimetria deve ir até a referida seção. O espaçamento das seções depende das modificações do leito e da declividade da linha de água, mas espaçamentos entre 500 e 1000 m são suficientes;
(f) cadastramento das obstruções ao escoamento ao longo do trecho urbano como pontes, edifícios e estradas, entre outros.

Quando a declividade da linha de água ao longo da cidade é muito pequena e não existem rios de porte no perímetro urbano os ítens **d**, **e** e **f** são desnecessários. No caso das obstruções, essas podem ser importantes se reduzirem significativamente a seção transversal.

Na prática, é muito difícil a obtenção de todas as informações relacionadas acima, portanto, é conveniente dividir o estudo em duas fases. Na primeira fase, dita preliminar, seriam delimitadas com precisão reduzida as áreas de inundação com base em mapas topográficos existentes e marcas de enchentes. Na segunda fase, com a delimitação aproximada das áreas de inundação, a topografia com maior detalhe seria realizada nas áreas definidas, juntamente com a batimetria do rio, e calculados com precisão os dois mapas referidos.

Mapeamento preliminar : Nas cidades de porte superior a 10.000 habitantes existem projetos de abastecimento de água. Para esses projetos é realizada uma topografia com espaçamento de 5m em 5m. Estes mapas não possuem a precisão desejada para este tipo de estudo, mas podem ser utilizados preliminarmente. Os erros podem ser minimizados com visitas in loco, fotografias aéreas e verificação de pontos característicos do levanta-

mento. Nem sempre estes mapas se referem à cota absoluta desejada; nesse caso é necessário procurar o RN do mapa existente e estabelecer a referência com o mapa disponível. A seguir pode-se estabelecer a relação entre o zero da régua linimétrica e o RN escolhido, utilizado na elaboração do mapa topográfico.

Considerando que os níveis de enchentes são conhecidos na seção da régua, para transportá-lo para as seções ao longo do trecho urbano é necessário conhecer a declividade da linha de água. Esta declividade pode ser obtida através das marcas de enchentes ou medindo a mesma durante a estiagem. Este último procedimento pode apresentar erros, já que se existirem obstruções ao escoamento durante as enchentes, a declividade pode-se modificar significativamente.

Para a determinação da declividade da linha de água deve-se recomendar, ao topógrafo, o seguinte: (a) nivelar todas as marcas de enchente existentes na cidade; (b) medir o nível de água com espaçamento entre 500m e 1000 m ao longo do trecho urbano, anotando a cota da régua para o momento do levantamento.

Para verificar o trabalho do topógrafo pode-se utilizar o seguinte: a) conferir se a declividade é decrescente na direção do fluxo; b) para verificar o nivelamento das marcas na vizinhança da seção da régua linimétrica some ao zero da régua os valores observados no linígrafo e verifique se correspondem às marcas niveladas. Deve-se considerar que a marca de enchente não corresponde ao nível máximo ocorrido, já que o rio mancha a parede quando o nível se mantém por algum tempo. No caso do rio ficar muito pouco tempo no pico, a marca deve aparecer para níveis menores.

Os critérios para determinação da linha de água e os níveis de enchente ao longo da cidade são os seguintes:

a) conhecida a curva de freqüência de níveis de inundação na seção da régua linimétrica, obtenha os níveis absolutos correspondentes aos tempos de retorno desejados;
b) defina as seções ao longo do rio. Essas seções são escolhidas com base nas marcas existentes e/ou nos níveis medidos a cada 500m e 1000 m;
c) calcule a declividade da linha de água para os diferentes trechos definidos pelas seções referenciadas. A declividade é calculada com a distância medida ao longo do rio. Deve-se tomar cuidado quando existirem pontes e/ou estradas que obstruam o escoamento;

d) para os níveis calculados nas seções do posto, obtenha as cotas correspondentes para as outras seções, utilizando a declividade da linha de água obtida.

Mapeamento definitivo : Neste caso é necessário o levantamento detalhado da topografia das áreas de risco com o tempo de retorno menor ou igual a 100 anos. A escolha do tempo de retorno é arbitrária e depende da definição do futuro zoneamento. Caso tenha ocorrido uma enchente com tempo de retorno superior a 100 anos, deve-se escolher o maior valor ocorrido.

O levantamento detalhado engloba a determinação das curvas de nível com espaçamento de 0,5m ou 1,0m, dependendo das condições do terreno. Em algumas cidades o espaçamento pode ser muito detalhado. Nesse levantamento deve constar o nível do meio da rua de cada esquina das áreas de risco.

Além da topografia é necessário o levantamento das obstruções ao escoamento, como pilares e encostos de pontes, estradas com taludes, edifícios, caracterizando em planta e, em seção, o tipo de cobertura e obstrução.

Com a batimetria ao longo da cidade é possível determinar as cotas de inundação, de acordo com o seguinte procedimento: (a) um modelo de escoamento permanente, para cálculo da linha de água, deve ser utilizado. O método é utilizado, inicialmente, para ajuste das rugosidades, com base nas marcas de enchentes e na curva de descarga do posto fluviométrico. Para tanto, a linha de água é determinada para a vazão máxima registrada, no posto fluviométrico, e o nível correspondente no sentido de jusante para montante. A rugosidade correta será aquela cuja linha de água se aproximar das marcas de enchente; (b) conhecidas as rugosidades pode-se estabelecer a linha de água para as vazões correspondentes aos diferentes tempos de retorno e, em conseqüência, elaborar o mapeamento das áreas atingidas.

Para as áreas de risco deve-se realizar um levantamento da ocupação urbana existente e de propriedade do solo. Estas informações são essenciais para a definição das propostas de zoneamento da área de risco.

Zoneamento : O zoneamento própriamente dito é a definição de um conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação, visando à minimização futura das perdas materiais e humanas em face das grandes cheias. Conclui-se, daí, que o zoneamento urbano permitirá um desenvolvimento racional das áreas ribeirinhas.

A regulamentação do uso das zonas de inundação apoia-se em mapas com demarcação de áreas de diferentes riscos e nos critérios de ocupação das mesmas, tanto quanto ao uso como quanto aos aspectos construtivos. Para que esta regulamentação seja utilizada, beneficiando as comunidades, a mesma deve ser integrada à legislação municipal sobre loteamentos, construções e habitações, a fim de garantir a sua observância. Sendo assim, o conteúdo deste capítulo tem a finalidade de servir de base para a regulamentação da várzea de inundação, através dos planos diretores urbanos, permitindo às prefeituras a viabilização do controle efetivo.

O Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), apresentou uma proposta para os artigos da seção de Recursos Hídricos das Leis Orgânicas municipais do referido Estado, onde o zoneamento era recomendado nos seguintes termos:

"Art. 2º Caberá ao município, no campo dos recursos hídricos:

IV - proceder ao zoneamento das áreas sujeitas a riscos de inundações erosão e escorregamentos do solo, estabelecendo restrições e proibições ao uso, parcelamento e a edificação, nas áreas impróprias ou críticas de forma a preservar a segurança e a saúde pública".

O Water Resources Council (1971) definiu Zoneamento por: "Zoneamento envolve a divisão de unidades governamentais em distritos e a regulamentação dentro desses distritos de : a) usos de estruturas e da terra; b) altura e volume das estruturas; c) o tamanho dos lotes e densidade de uso. As características do Zoneamento, que o distingue de outros controles é que a regulamentação varia de distrito para distrito. Por essa razão, o Zoneamento pode ser usado, para estabelecer padrões especiais para uso da terra em áreas sujeitas à inundação. A divisão em distritos de terras, através da comunidade é usualmente baseada em planos globais de uso, que orientam o crescimento da comunidade".

Condições técnicas do zoneamento : O risco de ocorrência de inundação varia com a respectiva cota da várzea. As áreas mais baixas obviamente estão sujeitas a maior freqüência de ocorrência de enchentes. Assim sendo, a delimitação das áreas do zoneamento depende das cotas altimétricas das áreas urbanas.

O rio possui normalmente um ou mais leitos. O leito menor corresponde a seção de escoamento em regime de estiagem, ou de níveis

médios. O leito maior pode ter diferentes lances, de acordo com a seção transversal considerada e a topografia da várzea inundável. Esse leito, o rio costuma ocupar durante as enchentes. Quando o tempo de retorno de extravasamento do leito menor é superior a 2 anos, existe a tendência da população em ocupar a várzea nas mais diversas e significativas formas socioeconômicas. Essa ocupação gera, por ocasião das cheias, danos de grande monta aos ocupantes dessas áreas e, também, às populações a montante, que são afetadas pelas elevações de níveis decorrentes da obstrução ao escoamento natural causada pelos primeiros ocupantes (figura 3.14).

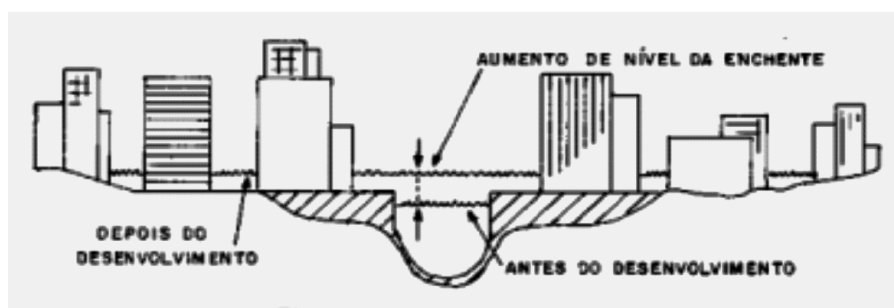



Figura 3.14. Invasões da várzea.

A seção de escoamento do rio pode ser dividida em três partes principais para efeito de zoneamento (figura 3.15), descritas a seguir.

<u>Zona de passagem da enchente</u> (faixa 1) - Esta parte da seção deve ficar liberada para funcionar hidraulicamente, evitando gerar aumento de níveis para montante. Qualquer construção nessa área reduzirá a área de escoamento, elevando os níveis a montante desta seção (figura 3.15). Portanto, em qualquer planejamento urbano, deve-se procurar manter esta zona desobstruída.

Os critérios técnicos geralmente utilizados são os seguintes :

(a) determine a cheia de 100 anos de tempo de retorno ou a que determina os limites da área de inundação;
(b) a seção de passagem da enchente será aquele que evitar aumentar os níveis no leito principal devido as obstruções no restante da seção. Como este valor dificilmente é nulo, adota-se um acréscimo

de nível no leito principal. Nos Estados Unidos adotou-se como acréscimo máximo do leito principal igual a um pé ou 30,45 cm. Veja a figura 3.16 para a definição desta faixa da várzea.

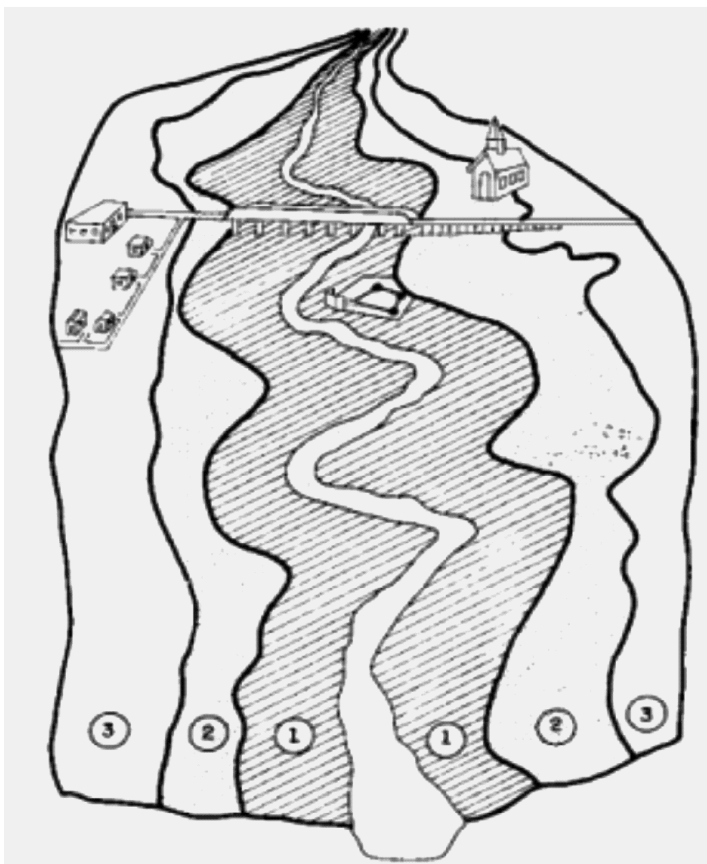



Figura 3.15. Regulamentação da zona inundável (U.S.WATER RESOURCES COUNCIL,1971).

Esta faixa do rio deve ficar desobstruída para evitar danos de monta e represamentos. Nessa faixa não deve ser permitida nenhuma nova construção e a Prefeitura poderá, paulatinamente, relocar as habitações existentes.

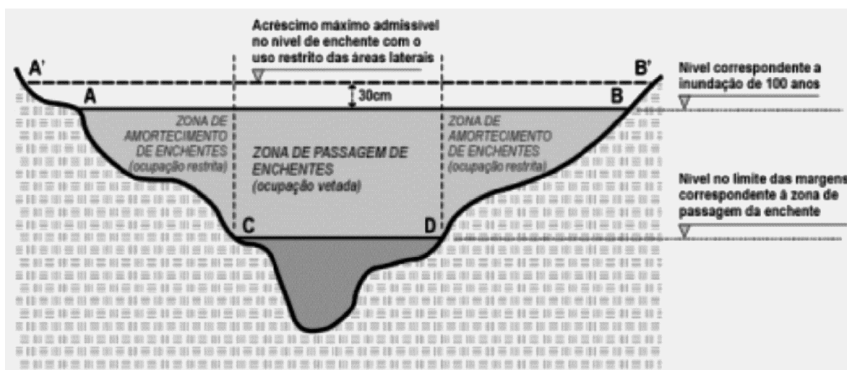



Figura 3.16 Definição da zona de passagem de enchente.

Na construção de obras como rodovias e pontes deve ser verificado se as mesmas produzem obstruções ao escoamento. Naquelas já existentes deve-se calcular o efeito da obstrução e verificar as medidas que podem ser tomadas para a correção. Não deve ser permitida a construção de aterro que obstrua o escoamento. Essa área poderia ter seu uso destinado a agricultura ou outro uso similar às condições da natureza. Adicionalmente, seria permitido a instalação de linhas de transmissão e condutos hidráulicos ou qualquer tipo de obra que não produza obstrução ao escoamento, como estacionamento, campos de esporte, entre outros.

Em algumas cidades poderão ser necessárias construções próximas aos rios. Nessa circunstância, deve ser avaliado o efeito da obstrução e as obras devem estar estruturalmente protegidas contra inundações.

Zona com restrições (faixa 2) - Esta é a área restante da superfície inundável que deve ser regulamentada. Esta zona fica inundada mas, devido às pequenas profundidades e baixas velocidades, não contribuem muito para a drenagem da enchente.

Esta zona pode ser subdividida em subáreas, mas essencialmente os seus usos podem ser:

(a) parques e atividades recreativas ou esportivas cuja manutenção, após cada cheia, seja simples e de baixo custo. Normalmente uma simples limpeza a reporá em condições de utilização, em curto espaço de tempo;

(b) uso agrícola;
(c) habitação com mais de um piso, onde o piso superior ficará situado, no mínimo, no nível do limite da enchente e estruturalmente protegida contra enchentes ;
(d) industrial, comercial, como áreas de carregamento, estacionamento, áreas de armazenamento de equipamentos ou maquinaria facilmente removível ou não sujeitos a danos de cheia. Neste caso, não deve ser permitido armazenamento de artigos perecíveis e principalmente tóxicos;
(e) serviços básicos: linhas de transmissão, estradas e pontes, desde que corretamente projetados.

Zona de baixo risco (faixa 3) - Esta zona possui pequena probabilidade de ocorrência de inundações, sendo atingida em anos excepcionais por pequenas lâminas de água e baixas velocidades. A definição dessa área é útil para informar a população sobre a grandeza do risco a que está sujeita. Esta área não necessita regulamentação, quanto às cheias.

Nesta área, delimitada por cheia de baixa freqüência, pode-se dispensar medidas individuais de proteção para as habitações, mas deve-se orientar a população para a eventual possibilidade de enchente e dos meios de proteger-se das perdas decorrentes, recomendando o uso de obras com, pelo menos, dois pisos, onde o segundo pode ser usado nos períodos críticos.

Regulamentação das zonas de inundação : Usualmente, nas cidades de países em desenvolvimento, a população de menor poder aquisitivo e marginalizada ocupa as áreas ribeirinhas de maior risco. A regulamentação da ocupação de áreas urbanas é um processo iterativo, que passa por uma proposta técnica que é discutida pela comunidade antes de ser incorporada ao Plano Diretor da cidade. Portanto, não existem critérios rígidos aplicáveis a todas as cidades, mas sim recomendações básicas que podem ser seguidas em cada caso.

Water Resources Council (1971) orienta a regulamentação com base em distritos, definido-se em cada um o seguinte: (a) um texto que apresente os regulamentos que se aplicam a cada distrito, junto com as providências administrativas; (b) um mapa delineando os limites dos vários usos nos distritos.

O zoneamento é complementado com a subdivisão das regulamentações, onde são orientadas as divisões de grandes parcelas de terra em pe-

quenos lotes, com o objetivo de desenvolvimento e venda de prédios. Portanto, essa é a fase de controle sobre os loteamentos. O Código de Construção orienta a construção de prédios quanto a aspectos estruturais, hidráulicos, de material e vedação. A regulamentação das construções permite evitar futuros danos. A seguir relacionamos alguns indicadores gerais que podem ser usados no zoneamento .

A proteção das habitações com relação às enchentes depende da capacidade econômica do proprietário em realizá-la. Com a implantação de um plano, a municipalidade poderá permitir as construções nessas áreas, desde que atendam condições como as seguintes (Tucci e Simões Lopes, 1985):

(a) estabelecimento de, pelo menos, um piso com nível superior à cheia que limita a zona de baixo risco;
(b) uso de materiais resistentes à submersão ou contato com a água;
(c) proibição de armazenamento ou manipulação e processamento de materiais inflamáveis, que possam pôr em perigo a vida humana ou animal durante as enchentes. Os equipamentos elétricos devem ficar em cota segura;
(d) proteção dos aterros contra erosões através de cobertura vegetal, gabiões ou outros dispositivos;
(e) prever os efeitos das enchentes nos projetos de esgotos pluvial e cloacal;
(f) estruturalmente, as construções devem ser projetadas para resistir à pressão hidrostática, que pode causar problemas de vazamento, entre outros, aos empuxos e momentos que podem exigir ancoragem, bem como às erosões que podem minar as fundações;
(g) fechamento de aberturas como portas, janelas e dispositivos de ventilação;
(h) estanqueidade e reforço das paredes de porões;
(i) reforço ou drenagem da lage do piso;
(j) válvulas em conduto;
(k) proteção de equipamentos fixos;
(l) ancoragem de paredes contra deslizamentos.

A decisão sobre a obrigatoriedade de proteção das novas construções

na zona de inundação é um processo que deve passar por uma discussão ampla da comunidade envolvida. No entanto, deve-se ter presente que, logo após as últimas enchentes, houve desvalorização imobiliária das áreas de risco. Com o passar do tempo, essas áreas adquirirão gradualmente valor imobiliário, devido ao natural espaçamento no tempo das cheias e assim, a implementação de um plano de zoneamento poderá trazer custos maiores de desapropriações (se forem necessárias) ou dificuldades no processo de obediência à regulamentação. Essa situação somente sofrerá modificação com a ocorrência de nova enchente, com mais danos. Essas condições são mais graves na zona de passagem da cheia, na qual a municipalidade necessita gradualmente remover as obras que obstruem o escoamento.

Para manter a memória das inundações nas ruas pode-se utilizar a pintura dos postes de luz com diferentes cores. Isto democratiza a informação sobre a inundação e evita problemas imobiliários de compra e venda nas áreas de risco.

Quanto às construções já existentes nas áreas de inundação, deverá ser realizado um cadastramento completo das mesmas e estabelecido um plano para reduzir as perdas no local, bem como àquelas provocadas pelo remanso, resultante da obstrução do escoamento. Várias são as condições existentes que deverão ser analisadas caso a caso. Algumas situações podem ser: a) para as obras públicas como escolas, hospitais, e prédios administrativos deve-se verificar a viabilidade de protegê-los ou removê-los para áreas seguras, a médio prazo; b) as subabitações como favelas e habitações de população de baixa renda, devem ter sua transferência negociada para áreas mais seguras; c) para áreas industriais e comerciais pode-se incentivar as medidas de proteção às construções e, se for o caso, de toda a área, às expensas dos beneficiados.

Quando ocorrem remoções ou transferências, o poder público deve estar preparado com planos urbanos para destinar estas áreas para outros usos ou finalidades de lazer, parques, evitando que venham a ser ocupadas novamente por subabitações.

Algumas ações públicas são essenciais neste processo tais como :

(a) evitar construção de qualquer obra pública nas áreas de risco como escolas, hospitais e prédios em geral. Para as existentes deve-se peparar um plano de remoção com o passar do tempo ;
(b) planejar a cidade para gradualmente deslocar seu eixo principal para os locais de baixo risco ;

(c) as entidades de financiamento deveriam evitar financiar obras em áreas de risco.
(d) utilizar mecanismos econômicos para o processo de incentivo e controle das áreas de risco : (1) retirar o imposto predial dos proprietários que mantiverem sem construção as áreas de risco e utilizem por exemplo, para agricultura, lazer, etc ; (2) procurar criar um mercado para as áreas de risco de tal forma que as mesmas se tornem públicas com o passar do tempo ;
(e) prever a imediata ocupação das áreas de risco público quando desocupadas com algum plano que demarque a presença no município ou do Estado.

3.5 Drenagem urbana

A tendência da urbanização das cidades brasileiras tem provocado impactos significativos na população e no meio ambiente. Estes impactos têm deteriorado a qualidade de vida da população, através do aumento da freqüência e do nível das inundações, redução da qualidade de água e aumento de materiais sólidos no escoamento pluvial.

Este processo é desencadeado principalmente pela forma como as cidades se desenvolvem, por projetos de drenagem urbana inadequados. Estes projetos têm como filosofia *escoar a água precipitada o mais rápido possível da área projetada*. Este critério aumenta em várias ordens de magnitude a vazão máxima, a freqüência e o nível de inundação de jusante.

No capítulo anterior foram destacados os impactos relacionados com o aumento do pico e do volume do escoamento de cheia, o aumento dos resíduos sólidos e a piora da qualidade da água. A seguir é ampliada esta análise, destacando-se como se desenvolve estes impactos dentro das cidades e as técnicas modernas de controle na fonte, micro e macrodrenagem dos impactos citados.

3.5.1 Impactos devido a urbanização

Impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico

O desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural. Com a impermeabilização do solo através de telhados, ruas, calçadas e pátios, a

água que infiltrava, passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização, passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções.

Na figura 3.17 é apresentado efeito sobre as variáveis do ciclo hidrológico devido a urbanização. O hidrograma típico de uma bacia natural e aquele resultante da urbanização são apresentados na figura 3.18.

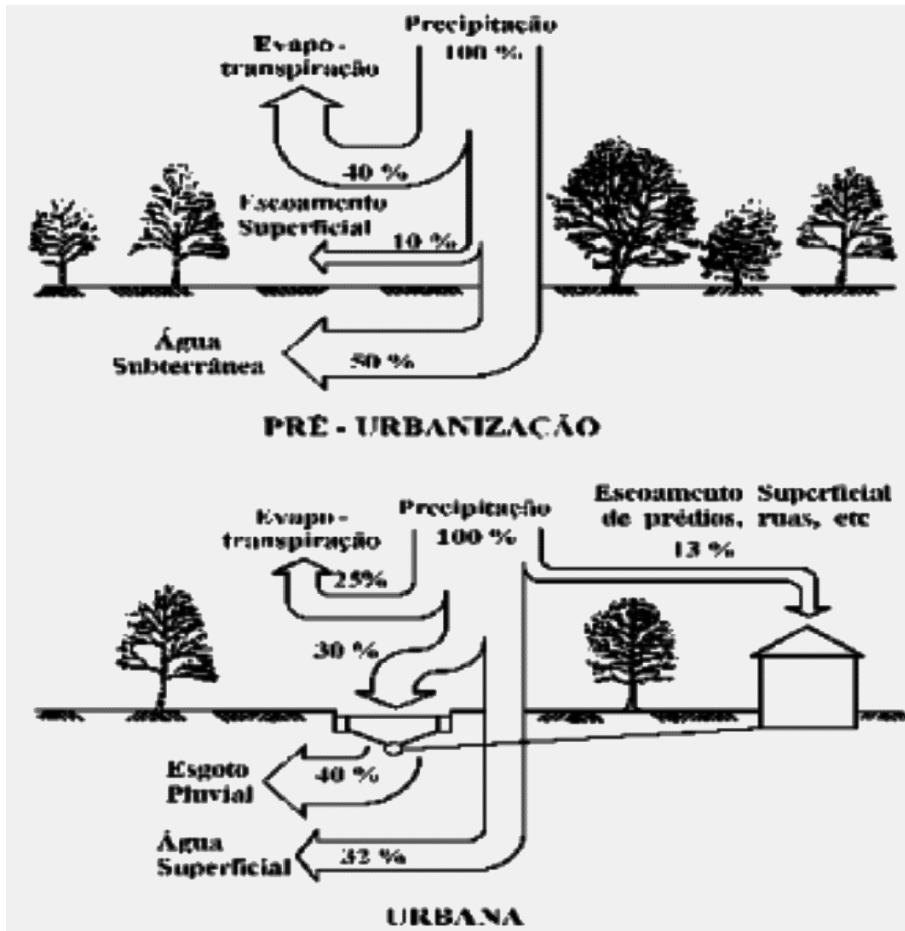



Figura 3.17 Características do balanço hídrico numa bacia urbana (OECD, 1986)

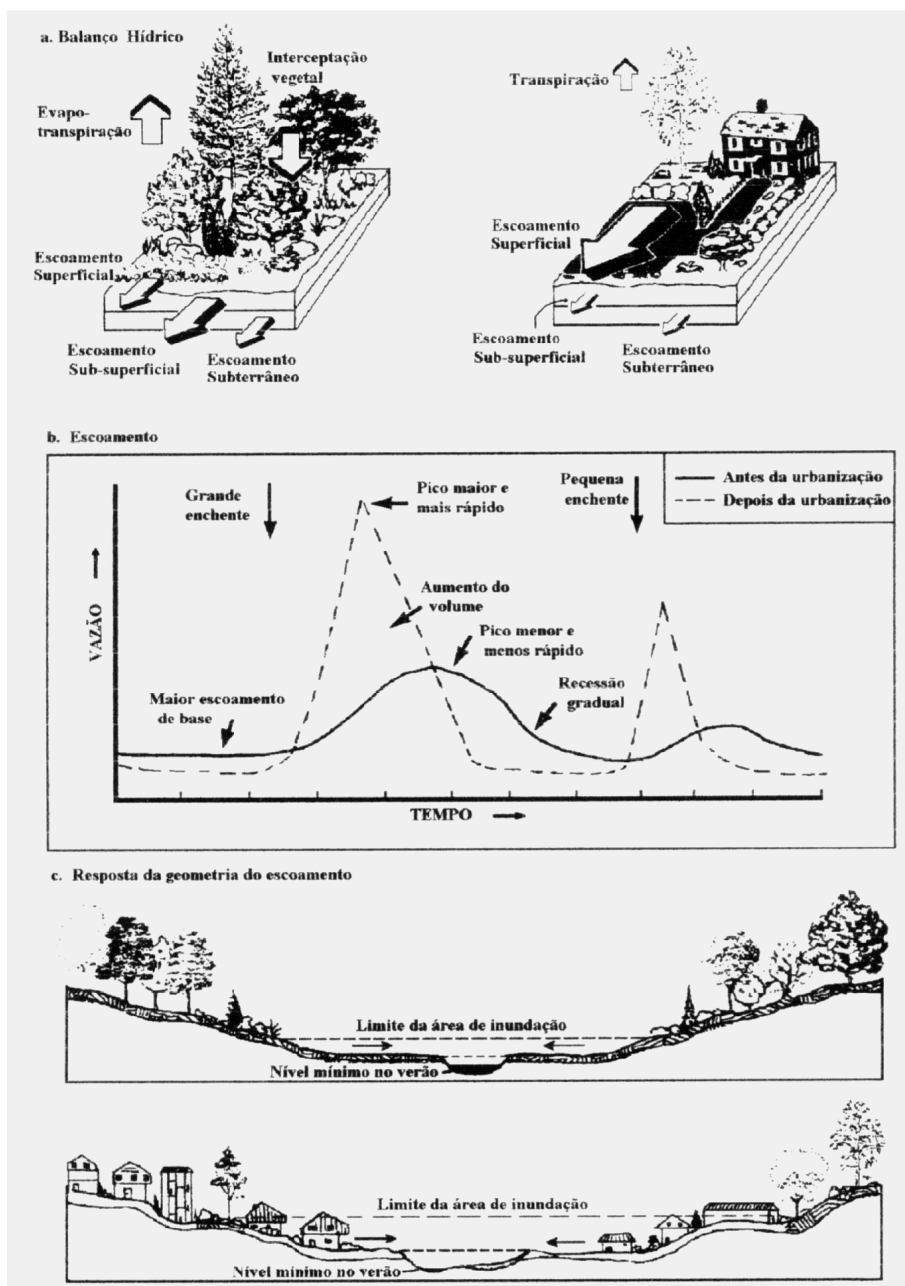



Figura 3.18 Impacto devido a urbanização (Schueler, 1987) .

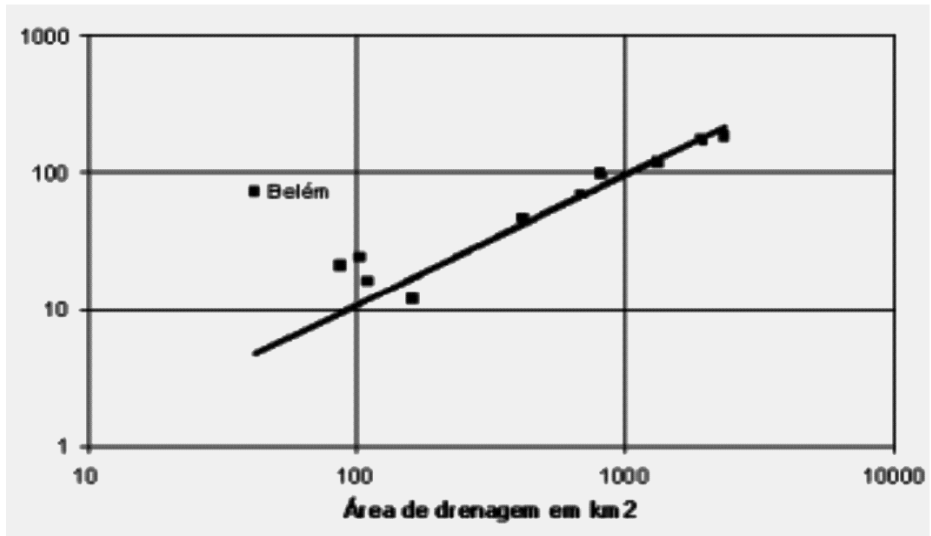



Figura 3.19 Vazão média de cheia em função da área de drenagem na Região Metropolitana de Curitiba.

Com a urbanização são introduzidas as seguintes alterações no referido ciclo hidrológico:

- Redução da infiltração no solo;
- Volume que deixa de infiltrar fica na superfície, aumentando o escoamento superficial. Além disso, como foram construídos condutos pluviais para o escoamento superficial, tornando-o mais rápido, ocorre redução do tempo de deslocamento. As vazões máximas também aumentam, antecipando seus picos no tempo (figura 3.18) A vazão máxima média de inundação pode aumentar de seis a sete vezes. Na bacia do rio Belém em Curitiba, com área de drenagem de 42 km2 e áreas impermeáveis da ordem de 60% foi obtido um aumento de 6 vezes na vazão média de cheia das condições rurais para a condição atual de urbanização. Na figura 3.19 é apresentada a vazão média de cheia em função da área de drenagem para bacias rurais e para a bacia do rio Belém. A tendência dos valores das bacias rurais permitiu estimar a vazão média de cheia da sua situação de pré-desenvolvimentoe comparar com o valor atual (ponto na figura).
- Com a redução da infiltração, o aqüífero tende a diminuir o nível do lençol freático por falta de alimentação (principalmente quando a

área urbana é muito extensa), reduzindo o escoamento subterrâneo. As redes de abastecimento e cloacal possuem vazamentos que podem alimentar o aqüíferos, tendo efeito inverso do mencionado;

- Devido a substituição da cobertura natural ocorre uma redução da evapotranspiração, já que a superfície urbana não retém água como a cobertura vegetal e não permite a evapotranspiração das folhagens e do solo. Apesar disto, as superfícies urbanas geradas pelas cidades são aquecidas e nas precipitações de baixa intensidade pode ocorrer maior evaporação.

Impacto ambiental sobre o ecossistema aquático

Com o desenvolvimento urbano vários elementos antrópicos são introduzidos na bacia hidrográfica que atuam sobre o ambiente. Alguns dos principais problemas são discutidos a seguir.

Aumento da Temperatura: As superfícies impermeáveis absorvem parte da energia solar aumentando a temperatura ambiente, produzindo ilhas de calor na parte central dos centros urbanos, onde predomina o concreto e o asfalto. O asfalto, devido a sua cor, absorve mais energia do que as superfícies naturais e o concreto. A medida que a sua superfície envelhece, escurece e aumenta a absorção de radiação solar. O aumento da absorção de radiação solar por parte da superfície aumenta a emissão de radiação térmica de volta para o ambiente, gerando, calor. O aumento de temperatura também cria condições de movimento de ar ascendente que pode criar de aumento de precipitação. Silveira (1997) mostra que a parte central de Porto Alegre apresenta maior índice pluviométrico que a sua periferia, atribuindo essa tendência a urbanização.

Aumento de sedimentos e material sólido: Durante o desenvolvimento urbano, o aumento dos sedimentos produzidos pela bacia hidrográfica é significativo, devido às construções, limpeza de terrenos para novos loteamentos, construção de ruas, avenidas e rodovias entre outras causas. Na figura 3.20 pode-se observar a tendência de produção de sedimentos de uma bacia nos seus diferentes estágios de desenvolvimento.

As principais conseqüências ambientais da produção de sedimentos são as seguintes:

- assoreamento das seções da drenagem, com redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos. A lagoa da Pampulha é um exemplo de um lago urbano que tem sido assoreado. O arroio Dilúvio em Porto Alegre, devido a sua largura e pequena profundidade, durante as estiagens, tem depositado no canal a produção de sedimentos da bacia e criado vegetação, reduzindo a capacidade de escoamento durante as enchentes;
- transporte de poluentes agregados ao sedimento, que contaminam as águas pluviais

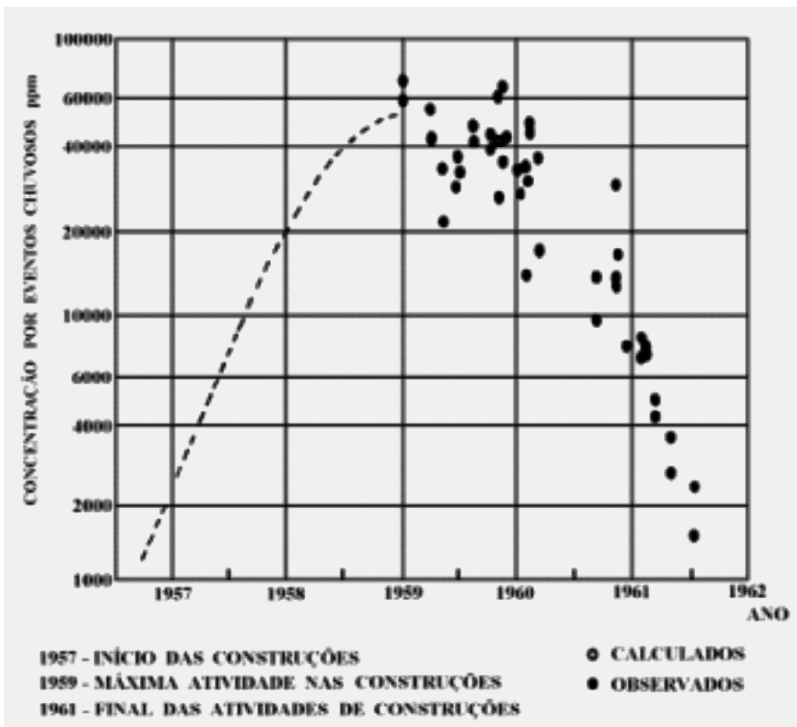



Figura 3.20 Variação da produção de sedimentos em decorrência do desenvolvimento urbano (Dawdy, 1967)

A medida que a bacia é urbanizada, e a densificação consolidada, a produção de sedimentos pode reduzir (figura 3.20), mas um outro problema aparece, que é a produção de lixo. O lixo obstrui ainda mais a drenagem e

cria condições ambientais ainda piores. Esse problema somente é minimizado com adequada freqüência da coleta e educação da população com multas pesadas (veja capítulo anterior).

Qualidade da água pluvial : A qualidade da água do pluvial não é melhor que a do efluente de um tratamento secundário. A quantidade de material suspenso na drenagem pluvial é superior à encontrada no esgoto in natura. Esse volume é mais significativo no início das enchentes. Na figura 3.21 pode-se observar amostras de água pluvial disposta segundo um relógio (figura das garrafas). No início existe pequena concentração, logo após a concentração é alta, para após alguns intervalos de tempo se reduzir substancialmente. Nos primeiros 25 mm de chuva geralmente se concentram 95% da carga. O polutagrama gerado por uma área urbana após um período seco mostra um pico de concentração antes do pico do hidrograma, indicando que a concentração no início é alta, mesmo com pequena vazão.

Os esgotos podem ser combinados (cloacal e pluvial num mesmo conduto) ou separados (rede pluvial e cloacal separadas). No Brasil, a maioria das redes é do segundo tipo; somente em áreas antigas de algumas cidades existem sistemas combinados. Atualmente, devido a falta de capacidade financeira para ampliação da rede de cloacal, algumas prefeituras tem permitido o uso da rede pluvial para transporte do cloacal, o que pode ser uma solução inadequada à medida que esse esgoto não é tratado, além de inviabilizar algumas soluções de controle quantitativo do pluvial.

Os poluentes que ocorrem na área urbana variam muito, desde compostos orgânicos a metais altamente tóxicos. Alguns poluentes são usados para diferentes funções no ambiente urbano como inseticidas e fertilizantes, como chumbo proveniente das emissões dos automóveis e óleos de vazamento ou de caminhões, ônibus e automóveis estes contaminantes são resultados de atividades dentro do ambiente urbano. A fuligem resultante das emissões de gases dentro do ambiente urbano dos veículos, das industrias, queima de resíduos se depositam na superfície e são lavados pela chuva. A água, resultante desta lavagem chega aos rios contaminada.

Os principais poluentes encontrados no escoamento superficial urbano são: sedimentos, nutrientes, substâncias que consomem oxigênio, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e virus patogênicos. Os valores médios americanos são apresentados na Tabela abaixo.

A qualidade da água da rede pluvial depende de vários fatores: da limpeza urbana e sua freqüência, da intensidade da precipitação e sua distri-

buição temporal e espacial, da época do ano e do tipo de uso da área urbana. Os principais indicadores da qualidade da água são os parâmetros que caracterizam a poluição orgânica e a quantidade de metais.

Figura 3.21 Amostradores de qualidade da água pluvial. Início da precipitação com a garrafa marrom (posição do relógio a 45 min)

Contaminação de aqüíferos: As principais condições de contaminação dos aqüíferos urbanos são devido ao seguinte:

- Aterros sanitários contaminam as águas subterrâneas pelo processo natural de precipitação e infiltração. Deve-se evitar que sejam construídos aterros sanitários em áreas de recarga e procurar escolher as áreas com baixa permeabilidade. Os efeitos da contaminação nas águas subterrâneas devem ser examinados quando da escolha do local do aterro;
- Grande parte das cidades brasileiras utilizam fossas sépticas como destino final do esgoto. Esse conjunto tende a contaminar a parte superior do aqüífero. Esta contaminação pode comprometer o abastecimento de água urbana quando existe comunicação entre diferentes camadas dos aqüíferos através de percolação e de perfuração inadequada dos poços artesianos;

- A rede de condutos de pluviais pode contaminar o solo através de perdas de volume no seu transporte e até por entupimento de trechos da rede que pressionam a água contaminada para fora do sistema de condutos.

Tabela 3.7 Concentração para escoamento médio para alguns usos da terra urbano baseado no Programa Nacional de Escoamento urbano (americano) sendo Whalen e Cullum (1989)

Parâmetro	Residencial	Comercial	Industrial
TKN (mg/l)	0,23	1,5	1,6
No3 + No2 (mg/l)	1,8	0,8	0,93
Total P (mg/l)	0,62	2,29	0,42
Cobre (µmg/l)	56	50	32
Zinco (µmg/l)	254	416	1.063
Chumbo (mg/l)	293	203	115
COD (mg/l)	102	84	62
TSS (mg/l)	228	168	106
DBO (mg/l)	13	14	62

Controles na macrodrenagem que geram impactos

A situação do controle de enchentes nas áreas urbanas brasileiras devido á *urbanização* têm sido realizado de forma equivocada com sensíveis prejuízos para a população. A seguir é realizado um breve histórico deste enfoque e os principais problemas identificados.

A origem dos impactos devido a drenagem urbana que ocorrem na maioria das cidades brasileiras são as seguintes:

- Princípio dos projetos: A drenagem urbana tem sido desenvolvida com base no **princípio equivocado** de que : A melhor drenagem é a que retira a água excedente o mais rápido possível do seu local de origem.
- Não consideram a bacia como sistema de controle: todos os impactos gerados em cada projeto são transferidos de um ponto a outro dentro da bacia através de condutos e canalizações.

Em conseqüência destes projetos ocorrem os impactos citados nos itens anteriores com elevado prejuízo para diferentes grupos da população e para o poder público.

Na microdrenagem os projetos aumentam a vazão e esgotam todo o seu volume para jusante. Na macrodrenagem a tendência de controle da drenagem urbana é através da canalização dos trechos críticos. Este tipo de solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as conseqüências sejam previstas para o restante da mesma ou dentro de diferentes horizontes de ocupação urbana. A canalização dos pontos críticos acaba apenas transferindo a inundação de um lugar para outro na bacia. Este processo, em geral, ocorre na seguinte seqüência

Estágio 1: a bacia começa a ser urbanizada de forma distribuída, com maior densificação a jusante, aparecendo, no leito natural, os locais de inundação devido a estrangulamentos naturais ao longo do seu curso (figura 3.22a);

Estágio 2: as primeiras canalizações são executadas a jusante, com base na urbanização atual; com isso, o hidrograma a jusante aumenta, mas é ainda contido pelas áreas que inundam a montante e porque a bacia não está totalmente densificada. (figura 3.22b);

Estágio 3: com a maior densificação, a pressão pública faz com os administradores continuem o processo de canalização para montante. Quando o processo se completa, ou mesmo antes, as inundações retornam a jusante, devido ao aumento da vazão máxima, quando esta não tem mais condições de ser ampliada. As áreas de montante funcionavam como reservatórios de amortecimento. Neste estágio, a canalização simplesmente *transfere a inundação para jusante* (figura 3.22c). Já não existem espaços laterais para ampliar os canais a jusante, e as soluções convergem para o aprofundamento do canal, com custos extremamente altos (podendo chegar a US$ 50 milhões/km, dependendo do subsolo, largura, revestimento, etc.).

Este processo é prejudicial aos interesses públicos e representa um prejuízo extremamente alto para toda a sociedade ao longo do tempo. A sociedade paga cerca de 1000% a mais para um controle que aumenta dramaticamente as inundações.

Na figura 3.23 pode-se observar o conjunto dos processos que se origina no uso do solo e culminação com a aceleração do escoamento na drenagem.

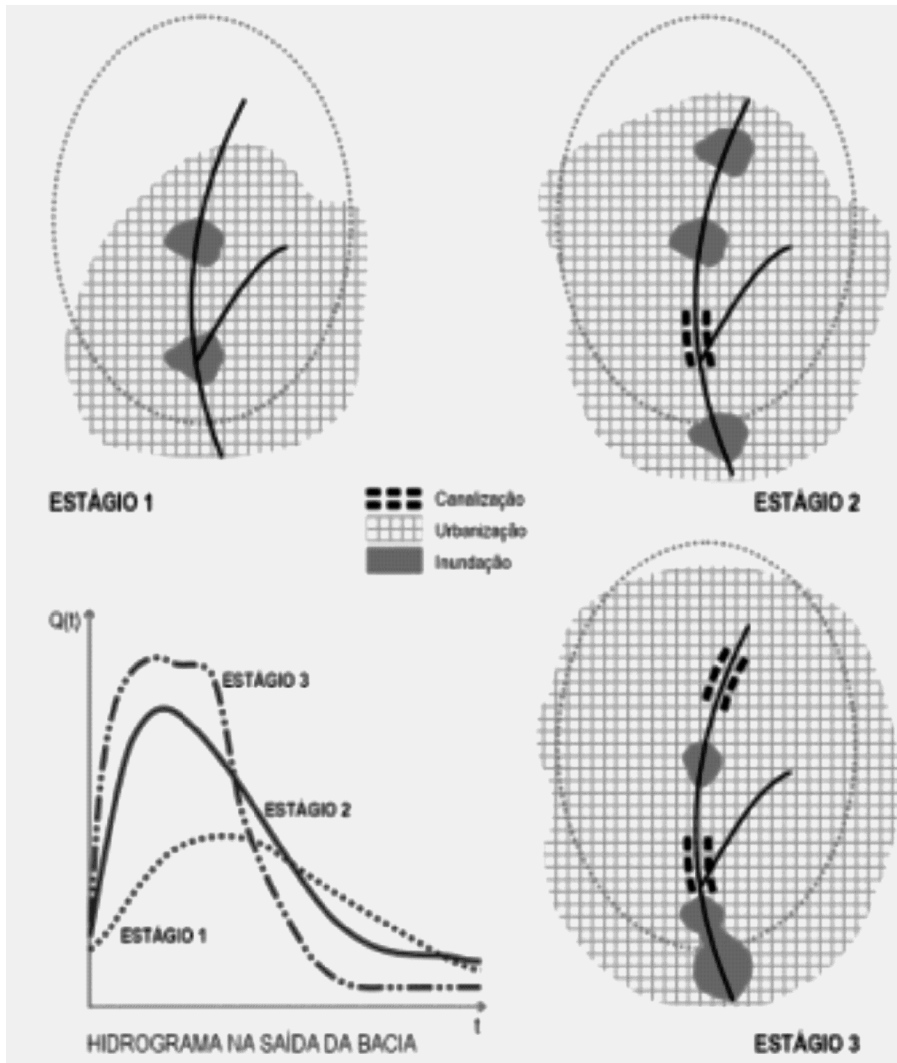



Figura 3.22 Estágio do desenvolvimento da drenagem

Figura 3.23 Processo de impacto da drenagem urbana (Sudersha, 2002)

3.5.2 Potenciais medidas de controle

As medidas de controle do escoamento podem ser classificadas, de acordo com sua ação na bacia hidrográfica, em:

- ***distribuída ou na fonte:*** é o tipo de controle que atua sobre o lote, praças e passeios;
- ***na microdrenagem:*** é o controle que age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos;
- ***na macrodrenagem:*** é o controle sobre os principais riachos urbanos.

As medidas de controle podem ser organizadas, de acordo com a sua ação sobre o hidrograma em cada uma das partes das bacias mencionadas acima, em:

- **infiltração e percolação:** normalmente, cria espaço para que a água tenha maior infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o fluxo subterrâneo para retardar o escoamento superficial;
- **armazenamento:** através de reservatórios, que podem ser de tamanho adequado para uso numa residência (1-3 m^3) até terem porte para a macrodrenagem urbana (alguns milhares de m^3). O efeito do reservatório urbano é o de reter parte do volume do escoamento superficial, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo;
- **aumento da eficiência do escoamento:** através de condutos e canais, drenando áreas inundadas. Esse tipo de solução tende a transferir enchentes de uma área para outra, mas pode ser benéfico quando utilizado em conjunto com reservatórios de detenção;
- **diques e estações de bombeamento:** solução tradicional de controle localizado de enchentes em áreas urbanas que não possuam espaço para amortecimento da inundação.

Medidas de controle distribuído

As principais medidas de controle localizado no lote, estacionamento, parques e passeios são denominadas, normalmente, de controle na fonte (*source control*). As principais medidas são as seguintes:

- o aumento de áreas de infiltração e percolação e
- o armazenamento temporário em reservatórios residenciais ou telhados.

As principais características do controle local do escoamento são as seguintes (Urbonas e Stahre, 1993):

- aumento da eficiência do sistema de drenagem de jusante dos locais controlados;
- aumento da capacidade de controle de enchentes dos sistemas;
- dificuldade de controlar, projetar e fazer manutenção de um grande

número de sistemas;
- o custo de operação e manutenção pode ser alto.

Esse tipo de sistema tem sido adotado em muitos países através de legislação apropriada, ou como um programa global de controle de enchentes, como descrito por Yoshimoto e Suetsugi (1990) para a bacia do rio Tsurumi, onde foram construídos cerca de 500 reservatórios de retenção de 1,3 m^3.

Instalações comerciais, industriais e esportivas que impermeabilizam o solo numa proporção significativa devem ser responsabilizadas pela distribuição de volume, evitando que aumente a vazão máxima a jusante; caso contrário, reduz-se a capacidade dos condutos de transportar a cheia, provocando inundação. Em geral, o agente causador do acréscimo da vazão fica a montante do local de sua conseqüência. Sendo assim, se não houver regulamentação e educação sobre o assunto, os impactos se multiplicar-se-ão, como já acontece em grande parte das cidades brasileiras.

Infiltração e percolação: Os sistemas urbanos, como mencionado anteriormente, criam superfícies impermeáveis que não existiam na bacia hidrográfica, gerando impactos de aumento do escoamento, que é transportado através de condutos e canais. Esses dispositivos hidráulicos apresentam custos diretamente relacionados com a vazão máxima, aumentada pela impermeabilização. Para reduzir esses custos e minimizar os impactos a jusante, uma das ações é a de permitir maior infiltração da precipitação, criando condições, a mais próxima possível das condições naturais.

As vantagens e desvantagens dos dispositivos que permitem maior infiltração e percolação são as seguintes (Urbonas e Stahre, 1993):

- aumento da recarga; redução de ocupação em áreas com lençol freático baixo; preservação da vegetação natural; redução da poluição transportada para os rios; redução das vazões máximas à jusante; redução do tamanho dos condutos;
- os solos de algumas áreas podem ficar impermeáveis com o tempo; falta de manutenção; aumento do nível do lençol freático, atingindo construções em subsolo.

A *infiltração* é o processo de transferência do fluxo da superfície para o interior do solo. A *capacidade de infiltração* depende das características do solo

e do estado de umidade da camada superior do solo, denominada também de zona não-saturada. A velocidade do fluxo de água através da camada não-saturada do solo até o lençol freático (zona saturada) é denominado de *percolação*. A percolação também depende do estado de umidade da camada superior do solo e do tipo de solo. Determinados tipos de solos apresentam maiores dificuldades de percolação e pequeno volume de armazenamento, o que inviabiliza seu uso, já que poderão: (a) manter níveis de água altos por muito tempo na superfície; (b) ter pouco efeito na redução do volume final do hidrograma.

Os principais dispositivos para criar maior infiltração são discutidos a seguir:

Planos de infiltração: Existem vários tipos, de acordo com a sua disposição local. Em geral, essas áreas são gramados laterais, que recebem a precipitação de uma área permeável, como residência ou edifícios (figura 3.24). Durante precipitações intensas, essas áreas podem ficar submersas, se a sua capacidade for muito inferior à intensidade da precipitação. Caso a drenagem transporte muito material fino, a capacidade de infiltração pode ser reduzida, necessitando limpeza do plano para manter sua capacidade de funcionamento.

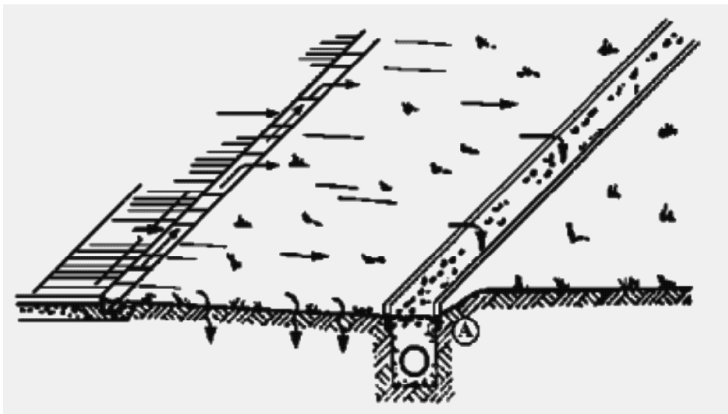



Figura 3.24 Planos de infiltração com valo de infiltração

Valos de infiltração: Esses são dispositivos de drenagem lateral, muitas vezes utilizados paralelos às ruas, estradas, estacionamentos e conjuntos habitacionais, entre outros (Figura 3.25). Esses valos concentram o fluxo das áreas adjacentes e criam condições para uma infiltração ao longo do seu comprimento. Após uma precipitação intensa, o nível sobe e, como a infiltração é mais lenta, mantém-se com água durante algum tempo. Portanto, o seu volume deve ser o suficiente para não ocorrer alagamento. Esse dispositivo funciona, na realidade, como um reservatório de detenção, à medida que a drenagem que escoa para o valo é superior à capacidade de infiltração. Nos períodos com pouca precipitação ou de estiagem, ele é mantido seco. Esse dispositivo permite, também, a redução da quantidade de poluição transportada a jusante.

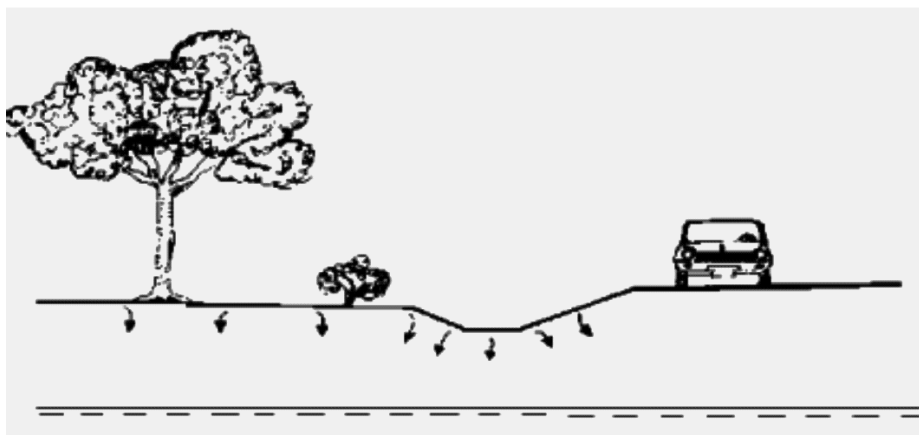



Figura 3.25 - Valos de infiltração (Urbonas e Stahre, 1993)

Bacias de percolação: Dispositivos de percolação dentro de lotes permitem, também, aumentar a recarga e reduzir o escoamento superficial. O armazenamento é realizado na camada superior do solo e depende da porosidade e da percolação. Portanto, o lençol freático deve ser baixo, criando espaço para armazenamento. Para áreas de lençol freático alto, esse tipo de dispositivo não é recomendado. As bacias são construídas para recolher a água do telhado e criar condições de escoamento através do solo. Essas bacias são construídas removendo-se o solo e preenchendo-o com cascalho, que cria o espaço para o armazenamento (figura 3.26). De acordo com o solo, é necessário criar-se maiores condições de drenagem. Para o solo argi-

loso com menor percolação, é necessário drenar o dispositivo de saída. A principal dificuldade encontrada com o uso desse tipo de dispositivo é o entupimento dos espaços entre os elementos pelo material fino transportado, portanto é recomendável o uso de um filtro de material geotextil. De qualquer forma, é necessário a sua limpeza após algum tempo (Urbonas e Stahre, 1993).

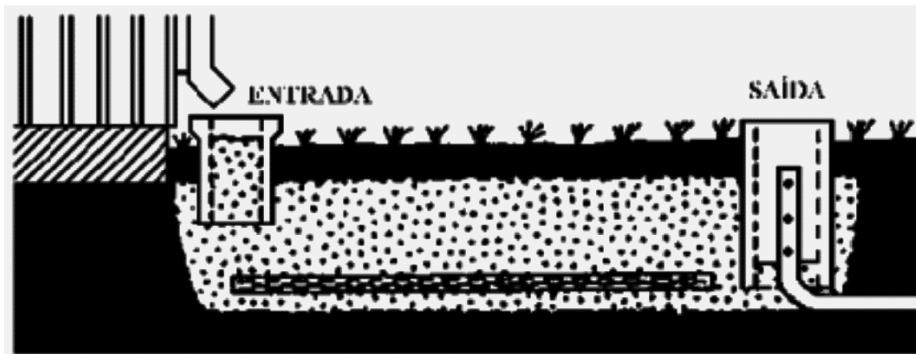



Figura 3.26 Exemplo de bacia de percolação (Holmstrand, 1984)

Dispositivos hidráulicos permeáveis: Existem diferentes tipos de dispositivos que drenam o escoamento e podem ser construídos de forma a permitir a infiltração. Alguns desses dispositivos são:

- *entradas permeáveis na rede de drenagem.* Na figura 3.27a, observa-se um filtro, na parte superior da caixa, para evitar entupimento;
- *trincheiras ou valas permeáveis* que, no fundo, são um caso especial de bacia de percolação e consistem de uma caixa com cascalho e filtro por onde passa um conduto poroso ou perfurado (figura 3.27b);
- *meio fio permeável:* esse dispositivo é utilizado fora do lote ou dentro de condomínios, indústrias ou áreas comerciais (figura 3.27c).

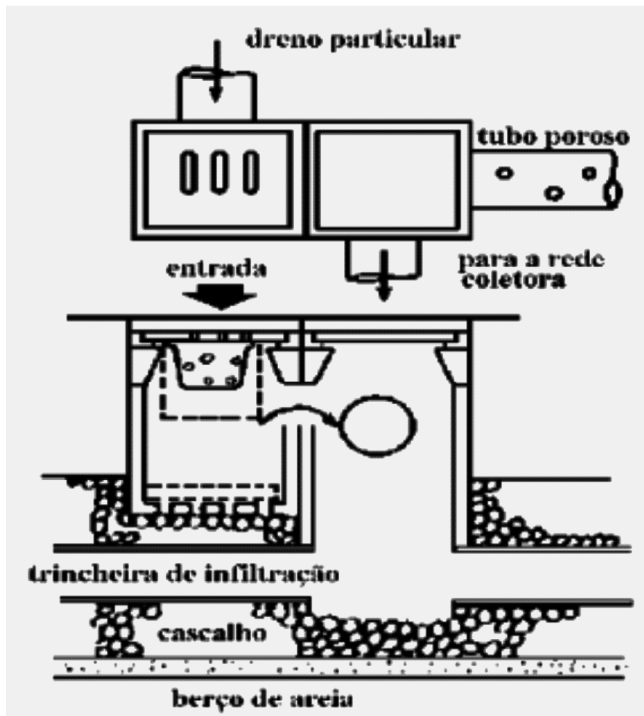
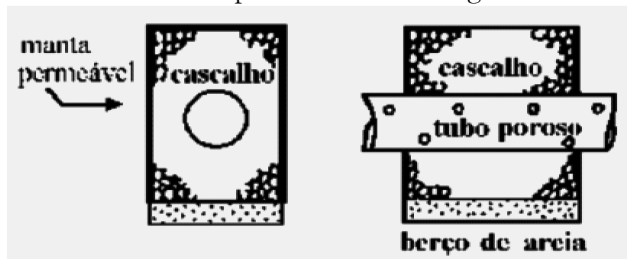
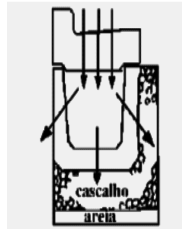
Pavimentos permeáveis: o pavimento permeável pode ser utilizado em passeios, estacionamentos, quadras esportivas e ruas de pouco tráfego. Em ruas de grande tráfego, esse pavimento pode ser deformado e entupido, tornando-se impermeável. As principais limitações destes dispositivo podem ser:

a - entradas permeáveis da drenagem

b - trincheiras ou valas permeáveis

c - meio fio permeável

Figura 3.27 Dispositivos hidráulicos permeáveis (Fujita, 1984)

- quando a água drenada é fortemente contaminada, haverá impacto sobre o lençol freático e o escoamento subterrâneo;
- falta de controle na construção e manutenção que podem entupir os dispositivos tornando ineficiente.

O dimensionamento envolve a determinação do volume drenado pela superfície ou por outra contribuinte que escoe para a área do pavimento. A precipitação é obtida com base no tempo de retorno escolhido e da curva Intensidade, duração e freqüência do local.

Para o dimensionamento de um sistema de infiltração total (sem tubos de drenagem na parte superior do reservatório), o reservatório de pedras deve ser grande o suficiente para acomodar o volume do escoamento de uma chuva de projeto menos o volume de escoamento que é infiltrado durante a chuva. O volume de escoamento superficial gerado pela precipitação pode ser estimado através de:

$$Vr = (i_p + c - i_e) \cdot t_d \qquad (3.3)$$

onde Vr é o volume de chuva a ser retido pelo reservatório(em mm), i_p é a intensidade máxima da chuva de projeto (em mm/h), i_e é a taxa de infiltração do solo (em mm/h), t_d é o tempo de duração da chuva (em horas) e c um fator de contribuição de áreas externas ao pavimento permeável e pode ser estimada pela equação seguinte

$$c = \frac{i_p \cdot Ac}{Ap} \qquad (3.4)$$

onde Ac é área externa de contribuição para o pavimento permeável e Ap é área de pavimento permeável.

A profundidade do reservatório de pedras do pavimento permeável é determinado por

$$H = \frac{Vr}{f} \qquad (3.5)$$

onde H é a profundidade do reservatório de pedras (em mm) e f é a porosidade do material. A porosidade pode ser determinada pela equação

$$f = \frac{V_L + V_G}{V_T} \qquad (3.6)$$

onde: V_L é o volume de líquidos, V_G é o volume de vazios e V_T é o volume total da amostra.

Os pavimentos permeáveis somente são viáveis para taxa de infiltração superior a 7 mm/h. Para a sua estimativa deve-se realizar uma sondagem a uma profundidade de 0,6 a 1,2 m abaixo do nível inferior do reservatório de pedras a fim de verificar o tipo de solo existente (já que tipos de solos com um percentual superior a 30% de argila ou 40% de silte e argila combinados não são bons candidatos para este tipo de dispositivo). A camada impermeável ou o nível do freático no período chuvoso deve estar pelo menos 1,2 m abaixo do pavimento.

Araujo et al (2001) realizaram experimentos com diferentes superfícies : (a) Solo compactado com declividade de 1 a 3 % ; (b) Pavimentos impermeáveis : uma parcela de concreto convencional de cimento, areia e brita, com declividade de 4% ; (c) Pavimentos semi-permeáveis: uma parcela de superfície com pedras regulares de granito com juntas de areia, conhecidas por paralelepípedos, com declividade de 4 %; e outra parcela revestida com pedras de concreto industrializado tipo "pavi S" igualmente com juntas de areia , conhecida por blocket, com declividade de 2%; (d) Pavimentos permeáveis: uma parcela de blocos de concreto com orifícios verticais preenchidos com material granular (areia) com declividade de 2 % e uma parcela de concreto poroso com declividade de 2%. Os experimentos foram realizados com precipitação de 110 mm/h, equivalente a um tempo de retorno de 5 anos para uma duração de 10 minutos. Os resultados dos experimentos são apresentados na tabela 3.8 onde se observa que os paralelepípedos absorvem parte da precipitação para uma intensidade muito alta e os pavimentos permeáveis praticamente não geram escoamento. Deve-se considerar que o experimento foi realizado com simulador de chuva numa superfície de 1 m^2, onde o efeito de armazenamento na superfície e no reservatório dos pavimentos permeáveis tem mais efeito.

O custo do pavimento permeável pode ser da ordem de 30 % maior que o pavimento comum devido a base necessária a sua implantação.

Armazenamento: O armazenamento pode ser efetuado em telhados, em pequenos reservatórios residenciais, em estacionamentos em áreas esportivas, entre outros.

Tabela 3.8 Coeficiente de escoamento para simulação de chuva em diferentes superfícies para uma intensidade de 110 mm/h

Superfície	C
Solo compactado	0,66
Concreto	0,95
Bloco de concreto	0,78
Paralelepípedo	0,60
Bloco vazado	0,03
Concreto permeável	0,03

Telhados: o armazenamento em telhados apresenta algumas dificuldades, que são a manutenção e o reforço das estruturas. Devido as características de clima brasileiro e o tipo de material usualmente utilizado nas coberturas, esse tipo de controle dificilmente seria aplicável à nossa realidade.

Lotes urbanos: o armazenamento no lote pode ser utilizado para amortecer o escoamento, em conjunto com outros usos, como abastecimento de água, irrigação de grama e lavagem de superfícies ou de automóveis. Na figura 3.29, é apresentado um reservatório desse tipo.

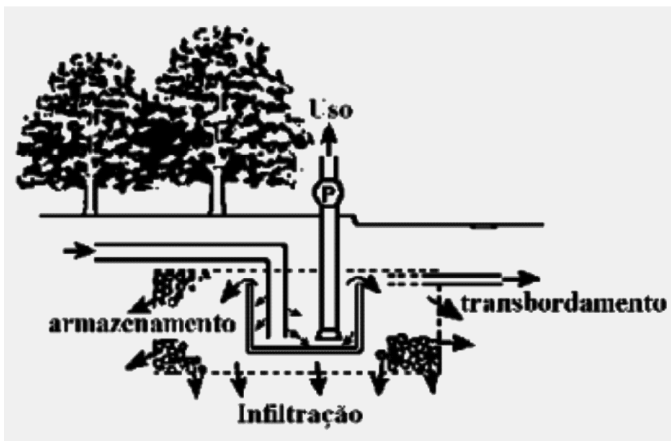



Figura 3.28 Reservatório com usos variados (Fujita, 1993)

Em regiões com pequena capacidade de distribuição de água, a precipitação nos telhados é escoada diretamente para um poço subterrâneo e, depois, clorada para uso doméstico (evite este uso em área muito urbanizada). A água coletada em telhados de centros esportivos pode ser coletada diretamente para uso de limpeza. Considerando-se uma superfície de 120 m^2, com uma precipitação anual de 1500 mm, é possível obter-se 360 m^3 por ano, que, distribuídos, representam cerca de 15 m^3 por mês, o suficiente para abastecer uma residência. Evidentemente que, à medida em que o reservatório é mantido com água, reduz-se sua capacidade de amortecimento.

O dimensionamento do volume em lotes urbanos pode ser realizado com base na equação seguinte (Tucci, 2001)

$$\frac{V}{A} = [0,278.C.\frac{a}{(t+b)^d} - Qa].t.60 \quad (3.7)$$

onde a duração t é usada em minutos e o volume é obtida em m^3/km^2; C é o coeficiente de escoamento,Qa é a vazão de pré-desenvolvimento;b e d são os coeficientes da equação de intensidade e freqüência do local($I=\frac{a}{(t_c+b)^d}$).

A duração que produz o maior volume é obtido pela derivada da equação 3.7.A equação resultante é não-linear, que é resolvida por iteração.

$$t = \left(\frac{t+s}{w}\right)^r - b \quad (3.8)$$

onde $w = \frac{Qa}{0,278.a.C(1-d)}$; $s = \frac{b}{1-d}$; $r = \frac{1}{d+1}$

Considerando que 25% das áreas de um loteamento sejam públicas, com 60% de área impermeável, estimou-se qual o volume necessário de detenção para diferentes níveis de impermeabilização nos lotes do loteamento (tabela 3.9)

Tucci (2001) determinou o escoamento de pré-desenvolvimento em Porto Alegre em 20,8 $l/s.km^2$ para 10 anos de tempo de retorno. A equação de volume (com base na formulação acima) para manter a vazão de pré-desenvolvimento em Porto Alegre resultou em

$$v = 4,25\ A\ .\ AI \quad (3.9)$$

onde v é o volume específico em m^3; A é a área de drenagem em ha; e AI a

área impermeável em %. Esta equação é utilizada para regulamentação do controle na fonte na cidade.

Tabela 3.9 Volume de detenção para Tempo de retorno de 2 anos em Porto Alegre

Área impermeável no lote %	Área impermeável na bacia %	Volume de detenção m³/ha	Parcela da bacia da área para detenção %
7	20	50,64	0,52
20	30	83,41	0,84
33,3	40	120,20	1,2
46,7	50	160,38	1,6
60	60	203,55	2,08
73,3	70	249,41	2,50
80	80	297,72	3,00

Características do reservatório: Na figura 3.30 pode-se observar um reservatório de lote e sua disposição dentro do ambiente do lote. Este tipo de reservatório não necessita ser fechado e pode-se utilizar gramados como apresentado na figura 3.31.

Medidas de Controle no Loteamento

A medida de controle de escoamento na microdrenagem tradicionalmente utilizada consiste em drenar a área desenvolvida através de condutos pluviais até um coletor principal ou riacho urbano. Esse tipo de solução acaba transferindo para jusante o aumento do escoamento superficial com maior velocidade, já que o tempo de deslocamento do escoamento é menor que nas condições preexistentes. Dessa forma, acaba provocando inundações nos troncos principais ou na macrodrenagem.

Como foi apresentado anteriormente, a impermeabilização e a canalização produzem aumento na vazão máxima e no escoamento superficial. Para que esse acréscimo de vazão máxima não seja transferido a jusante, utiliza-se o amortecimento do volume gerado, através de dispositivos como: tanques, lagos e pequenos reservatórios abertos ou enterrados, entre outros. Essas medidas são denominadas de controle a jusante (*downstream control*).

O objetivo das bacias ou reservatórios de detenção é minimizar o

impacto hidrológico da redução da capacidade de armazenamento natural da bacia hidrográfica.

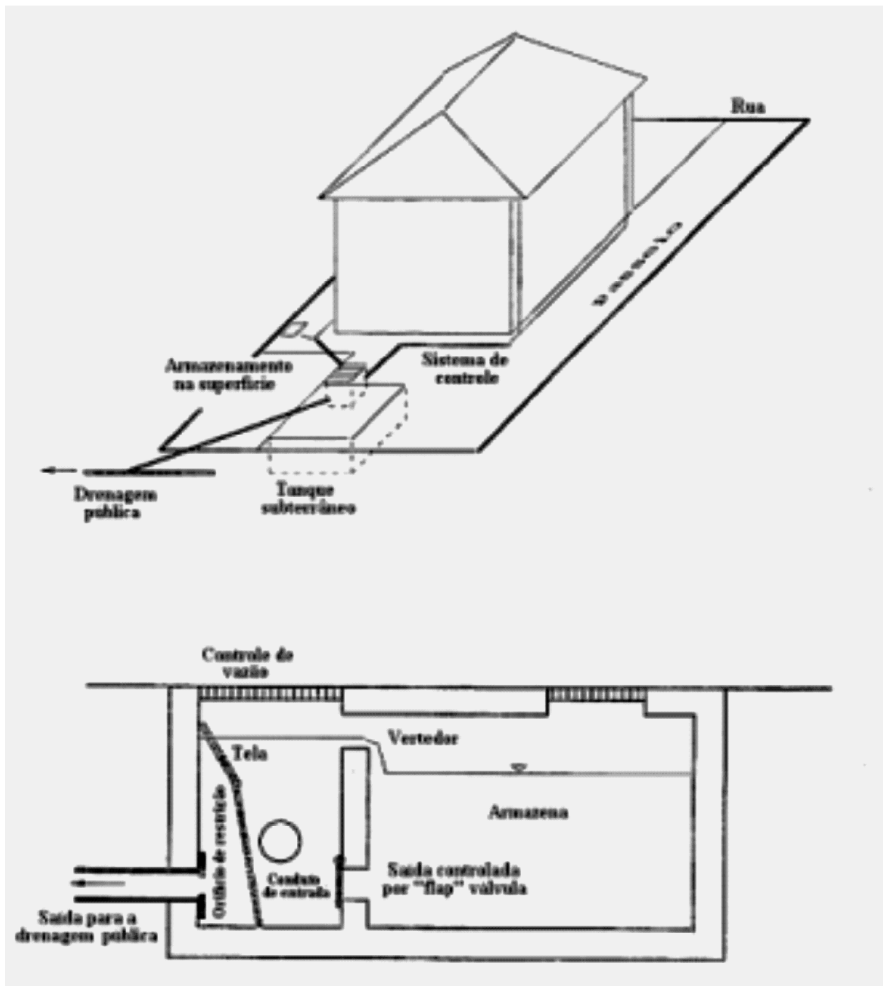



Figura 3.29 Reservatório de Lote

Este controle tem as seguintes vantagens e desvantagens (Urbonas e Stahre, 1993): custos reduzidos, se comparados a um grande número de controles distribuídos; custo menor de operação e manutenção; facilidade de administrar a construção; dificuldade de achar locais adequados; custo de aquisição da área; reservatórios maiores têm oposição por parte da população.

Figura 3.30 Reservatório aberto

Esse controle tem sido utilizado quando existem restrições por parte da administração municipal ao aumento da vazão máxima devido ao desenvolvimento urbano, e assim, já foi implantado em muitas cidades de diferentes países. O critério normalmente utilizado é que *a vazão máxima da área, com o desenvolvimento urbano, deve ser menor ou igual à vazão máxima das condições preexistentes para um tempo de retorno escolhido*.

Os reservatórios de detenção são utilizados de acordo com o objetivo do controle desejado. Esse dispositivo pode ser utilizado para:

Controle da vazão máxima: Este é o caso típico de controle dos efeitos de inundação sobre áreas urbanas. O reservatório é utilizado para amortecer o pico a jusante, reduzindo a seção hidráulica dos condutos e mantendo as condições de vazão preexistentes na área desenvolvida.

Controle do volume: Normalmente, esse tipo de controle é utilizado quando o escoamento cloacal e pluvial são transportados por condutos combinados ou quando recebe a água de uma área sujeita a contaminação. Como a capacidade de uma estação de tratamento é limitada, é necessário armazenar o volume para que possa ser tratado. O reservatório também é utilizado para

a deposição de sedimentos e depuração da qualidade da água, mantendo seu volume por mais tempo dentro do reservatório. O *tempo de detenção*, que é a diferença entre o centro de gravidade do hidrograma de entrada e o de saída, é um dos indicadores utilizados para avaliar a capacidade de depuração do reservatório.

Controle de material sólido: quando a quantidade de sedimentos produzida é significativa, esse tipo de dispositivo pode reter parte dos sedimentos para que sejam retirados do sistema de drenagem.

Esses reservatórios podem ser dimensionados para manterem uma lâmina permanente de água (*retenção*), ou secarem após o seu uso, durante uma chuva intensa para serem utilizados em outras finalidades (*detenção*) (figura 3.32a) A vantagem da manutenção da lâmina de água e do conseqüente volume morto é que não haverá crescimento de vegetação indesejável no fundo, sendo o reservatório mais eficiente para controle da qualidade da água. O seu uso integrado, junto a parques, pode permitir um bom ambiente recreacional. A vantagem de utilização desse dispositivo seco é que pode ser utilizado para outras finalidades. Uma prática comum consiste em dimensionar uma área com lâmina de água para escoar uma cheia freqüente, como a de dois anos, e planejar a área de extravasamento com paisagismo e campos de esporte para as cheias acima da cota referente ao risco mencionado. Quando a mesma ocorrer, será necessário realizar apenas a limpeza da área atingida, sem maiores danos a montante ou a jusante.

Na figura 3.32, são apresentados, de forma esquemática, o reservatório mantido seco e o com lâmina de água. Os reservatórios ou bacias de detenção mantidas secas são os mais utilizados nos Estados Unidos, Canadá e Austrália. São projetados, principalmente, para controle da vazão, com esvaziamento de até seis horas e com pouco efeito sobre a remoção de poluentes. Aumentando-se a detenção para 24 a 60 h, poderá haver melhora na remoção de poluentes (Urbonas e Roesner, 1994). Esse tipo de dispositivo retém uma parte importante do material sólido.

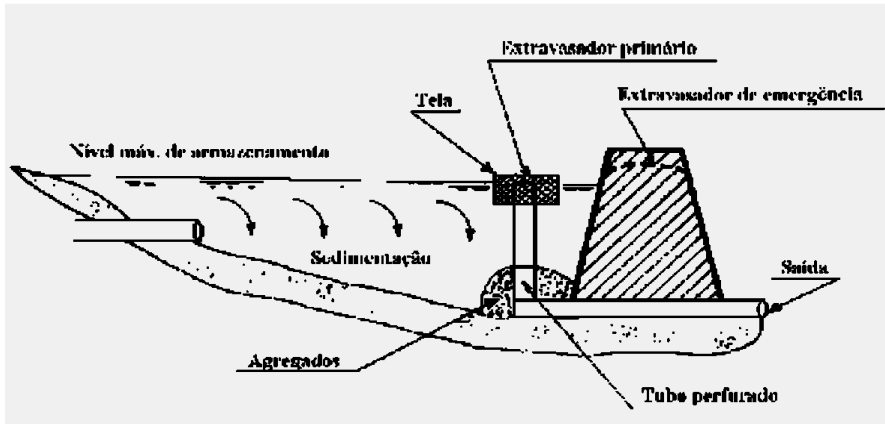
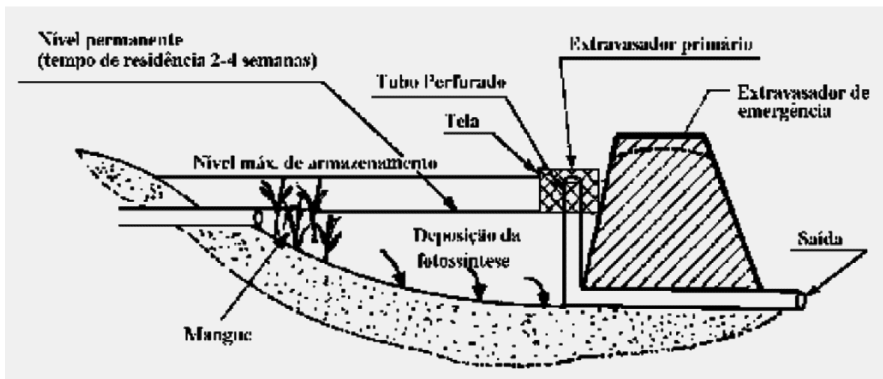
Os reservatórios de detenção com lâmina de água permanente são mais eficientes no controle de poluentes. Nos reservatórios que se mantêm secos, mas que estão ligados diretamente à drenagem, existe uma seção menor para o escoamento durante as estiagens. Nesse caso, é conveniente que o fundo dessa drenagem seja de concreto para facilitar a limpeza.

a - reservatório de detenção

b - reservatório de retenção

Figura 3.31 Reservatórios para controle de material sólido (Maidment, 1993)

Esse tipo reservatório pode ter um fundo natural, escavado ou de concreto. Os reservatórios em concreto são mais caros, mas permitem paredes verticais, com aumento de volume. Isso é útil onde o espaço tem um custo alto.

ASCE (1985) menciona que as instalações de detenção desse tipo que tiveram maior sucesso foram as que se integraram a outros usos, como a recreação, já que a comunidade, no seu cotidiano, usará esse espaço de re-

creação. Portanto, é desejável que o projeto desse sistema esteja integrado ao planejamento do uso da área.

Localização : Como foi mencionado acima, os reservatórios podem ser abertos ou enterrados, de acordo com as condições para sua localização. Em locais onde o espaço seja reduzido ou que seja necessário manter-se uma superfície superior integrada com outros usos, pode-se utilizar reservatórios subterrâneos; no entanto, o custo desse tipo de solução é superior ao dos reservatórios abertos.

Quando a drenagem utiliza a folga de volume do sistema para amortecimento, ele é chamado de *on-line*. No caso em que o escoamento é transferido para a área de amortecimento, após atingir uma certa vazão, o sistema é denominado *off-line*.

A localização depende dos seguintes fatores:

- em áreas muito urbanizadas, a localização depende da disponibilidade de espaço e da capacidade de interferir no amortecimento. Se existe espaço somente a montante, que drena pouco volume, o efeito será reduzido;
- em áreas a serem desenvolvidas, deve-se procurar localizar o reservatório nas partes de pouco valor, aproveitando as depressões naturais ou parques existentes. Um bom indicador de localização são as áreas naturais que formam pequenos lagos antes do seu desenvolvimento.

Medidas de controle na macrodrenagem

O controle de vazões na macrodrenagem urbana pode ser realizado por medidas estruturais ou não-estruturais (item anterior).

As principais medidas estruturais são: canalização, reservatório de amortecimento e diques em combinação com polders. As medidas não-estruturais envolvem o zoneamento de áreas de inundações, através da regulamentação do uso do solo com risco de inundação, ocupação com áreas de lazer, seguros contra inundações e previsão em tempo atual, entre outras.

O controle do impacto do aumento do escoamento devido à urbanização, na macrodrenagem, tem sido realizado, na realidade brasileira, através da canalização. O canal é dimensionado para escoar uma vazão de projeto para tempos de retorno que variam de 25 a 100 anos. Considere a bacia

da figura 3.33. No primeiro estágio a bacia não está totalmente urbanizada, e as inundações ocorrrem no trecho urbanizado, onde algumas áreas não estão ocupadas, porque inundam com freqüência.

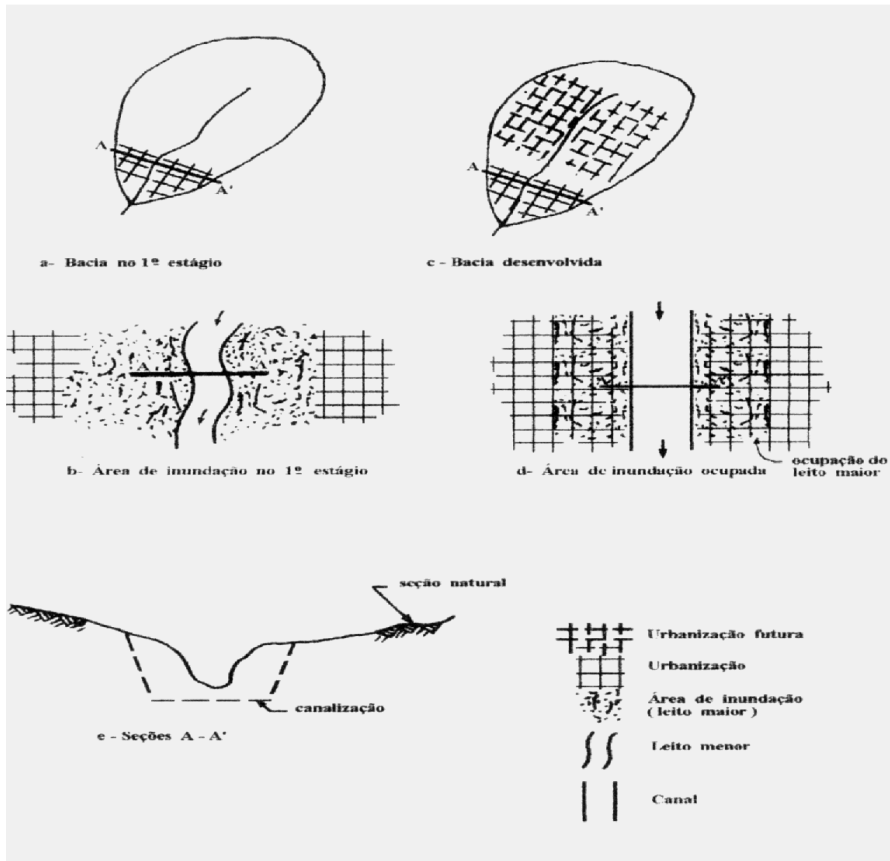



Figura 3.32 A ocupação da bacia hidrográfica e suas conseqüências

Com a canalização desse trecho, as inundações deixam de ocorrer. Nas áreas que, antes, eram o leito maior do rio e sofriam freqüentes inundações, existiam *favelas*, ou eram desocupadas. Essas áreas tornam-se valorizadas, pela suposta segurança do controle de enchentes. O loteamento dessas áreas leva a uma ocupação nobre de alto investimento. Com o desenvolvi-

mento da bacia de montante e o respectivo aumento da vazão máxima, que não é controlada pelo poder público, voltam a ocorrer inundações no antigo leito maior. Nessa etapa, não existe mais espaço para ampliar lateralmente o canal, sendo necessário aprofundá-lo, aumentando os custos em escala quase exponencial, já que é necessário estruturar as paredes do canal. Esses custos podem chegar a valores de US $ 50 milhões/km.

Esse processo, encontrado em muitas cidades brasileiras, pode ser evitado através do uso combinado das medidas mencionadas dentro do planejamento urbano, utilizando-se os princípios de controles mencionado no início deste capítulo.

Para o planejamento de controle da bacia, quando a mesma ainda está no primeiro estágio, pode-se utilizar o seguinte (figura 3.34):

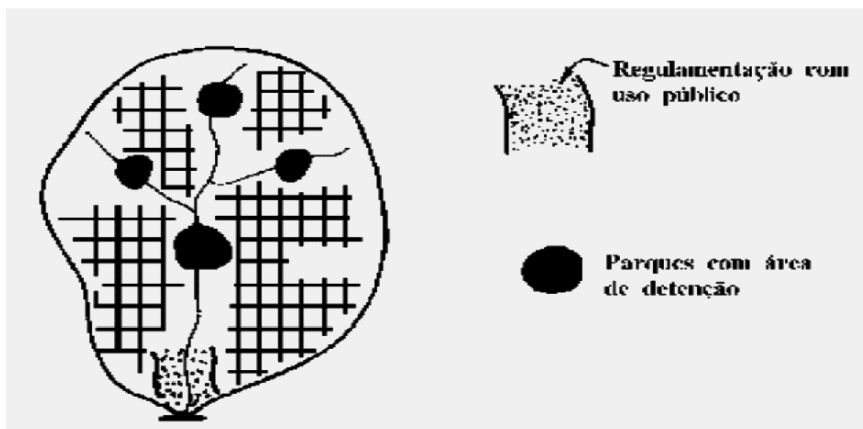



Figura 3.33 Planejamento de controle de bacia no primeiro estágio de urbanização

- ♦ regulamentação do uso do solo e ocupação, pelo poder público, das áreas naturalmente inundáveis;
  combinar essas áreas, para atuarem como bacias de detenção urbanas;
- ♦ regulamentar a microdrenagem para não ampliar a enchente natural, tratando cada distrito ou sub-bacia de acordo com sua capacidade e transferência a jusante. Nesse caso, é estudada cada sub-bacia e definido o risco de inundação que cada empreendedor deve manter nas condições naturais;
- ♦ utilizar parques e as áreas mencionadas acima para amortecer e pre-

servar os hidrogramas entre diferentes sub-bacias ;
- prever subsídios de impostos para as áreas de inundações e a troca de solo criado por compra de áreas de inundações; * nenhuma área desapropriada pelo poder público pode ficar sem implantação de infra-estrutura pública, parque ou área esportiva; caso contrário, será invadida.

Quando a bacia encontra-se num estágio avançado de desenvolvimento, a tendência é que as medidas estruturais predominem, com custos altos. No entanto, pode-se minimizar esses custos através do aumento da capacidade de amortecimento na bacia urbana, buscando recuperar, o máximo possível, o amortecimento natural pela exploração de todas as áreas possíveis. Yoshimoto e Suetsugi (1990) descreveram as medidas tomadas para reduzir a freqüência de inundações no rio Tsurumi, dentro da área da cidade de Tóquio. A bacia foi subdividida em três: retenção, retardo e áreas inferiores, e definida a vazão de controle. Na área de retenção, foram obtidos 2,2 milhões de m^3 para amortecimento através de ação municipal, além de outras medidas de retardo. Essas ações reduziram os prejuízos para enchentes recentes.

3.6 Plano Diretor de Drenagem Urbana

O Plano Diretor de Drenagem Urbana tem o objetivo de criar os mecanismos de gestão da infra-estrutura urbana relacionado com o escoamento das águas pluviais e dos rios na área urbana da cidade. Este planejamento visa evitar perdas econômicas, melhoria das condições de saúde e meio ambiente da cidade dentro de princípios econômicos, sociais e ambientais definidos pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana tem como meta: (a) planejar a distribuição da água pluvial no tempo e no espaço, com base na tendência de ocupação urbana compatibilização esse desenvolvimento e a infra-estrutura para evitar prejuízos econômicos e ambientais; (b) controlar a ocupação de áreas de risco de inundação através de restrições na áreas de alto risco e; (c) estabelecer uma convivência harmônica com as enchentes nas áreas de baixo risco.

Os condicionamentos urbanos são resultados de vários fatores que não serão discutidos aqui, pois parte-se do princípio que os mesmos foram definidos dentro âmbito do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano.

Devido a interferência que a ocupação do solo tem sobre a drenagem existem elementos do Plano de Drena Drenagem que são utilizados para regulamentar os artigos do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano.

3.6.1 Princípios

Os princípios a seguir caracterizados visam evitar os problemas descritos no capítulo anterior. Estes princípios são essenciais para o bom desenvolvimento de um programa consistente de drenagem urbana.

1. *Plano Diretor de Drenagem Urbana faz parte do Plano de Desenvolvimento Urbano*: a drenagem faz parte da infra-estrutura urbana, portanto deve ser planejada em conjunto dos os outros sistemas, principalmente o plano de controle ambiental, esgotamento sanitário, disposição de material sólido e tráfego;
2. O escoamento durante os eventos chuvosos não pode ser ampliado pela ocupação da bacia, tanto num simples loteamento, como nas obras de macrodrenagem existentes no ambiente urbano. Isto se aplica a um simples aterro urbano, como a construção de pontes, rodovias, e à implementação dos espaços urbanos. *O princípio é de que cada usuário urbano não deve ampliar a cheia natural.*
3. Plano de controle da drenagem urbana deve contemplar as bacias hidrográficas sobre as quais a urbanização se desenvolve. As medidas não podem reduzir o impacto de uma área em detrimento de outra, ou seja, *os impactos de quaisquer medidas não devem ser transferidos*. Caso isso ocorra, deve-se prever uma medida mitigadora.
4. O Plano deve prever a *minimização do impacto ambiental devido ao escoamento pluvial* através da compatibilização com o planejamento do saneamento ambiental, controle do material sólido e a redução da carga poluente nas águas pluviais que escoam para o sistema fluvial interno e externo à cidade.
5. O Plano Diretor de Drenagem urbana, *na sua regulamentação, deve contemplar o planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas*. Depois que a bacia, ou parte dela, estiver ocupada, dificilmente o poder público terá condições de responsabilizar aqueles que estiverem ampliando a cheia. Portanto, se a ação pública não for realizada preventivamente através do gerenciamento, as conseqüências econômicas e sociais futuras serão muito maiores para todo o município.

6. Nas áreas ribeirinhas, o controle de enchentes é realizado através de medidas estruturais e não-estruturais, que dificilmente estão dissociadas. As medidas estruturais envolvem grande quantidade de recursos e resolvem somente problemas específicos e localizados. Isso não significa que esse tipo de medida seja totalmente descartável. A política de controle de enchentes, certamente, poderá chegar a soluções estruturais para alguns locais, mas dentro da visão de conjunto de toda a bacia, onde estas estão racionalmente integradas com outras medidas preventivas (não-estruturais) e compatibilizadas com o esperado desenvolvimento urbano.
7. O controle deve ser realizado considerando a bacia como um todo e não em trechos isolados.
8. *Os meios de implantação do controle de enchentes são o PDUA, as Legislações Municipal/Estadual e o Manual de Drenagem*. O primeiro estabelece as linhas principais, as legislações controlam e o Manual orienta.
9. O controle permanente: o controle de enchentes é um processo permanente; não basta que se estabeleçam regulamentos e que se construam obras de proteção; é necessário estar atento as potenciais violações da legislação na expansão da ocupação do solo das áreas de risco. Portanto, recomenda-se que:

    - nenhum espaço de risco deve ser desapropriado se não houver uma imediata ocupação pública que evite a sua invasão;
    - a comunidade tenha uma participação nos anseios, nos planos, na sua execução e na contínua obediência das medidas de controle de enchentes.

10. A educação: a educação de engenheiros, arquitetos, agrônomos e geólogos, entre outros profissionais, da população e de administradores públicos é essencial para que <u>as decisões públicas sejam tomadas conscientemente por todos</u>;
11. O custo da implantação das medidas estruturais e da operação e manutenção da drenagem urbana deve ser transferido aos proprietários dos lotes, proporcionalmente a sua área impermeável, que é a geradora de volume adicional, com relação as condições naturais.
12. O conjunto destes princípios trata o <u>controle do escoamento urbano na fonte</u> distribuindo as medidas para aqueles que produzem o aumento do escoamento e a contaminação das águas pluviais.

13. É essencial uma gestão eficiente na manutenção de drenagem e na fiscalização da regulamentação.

3.6.2 Estrutura

A estrutura do Plano Diretor de Drenagem Urbana é apresentada na figura 3.35. Pode-se observar desta estrutura que existem um grupo de entradas ao Plano que são as informações básicas para o seu desenvolvimento que são: cadastro da rede pluvial; rede cloacal; coleta e disposição dos materiais sólidos, caracterização da ocupação urbana; características físicas da bacias hidrográficas e características sócio-econômicas. Além disso, existe o grupo de Planos associados que são: o Plano de Desenvolvimento Urbano e os Planos setoriais de Saneamento e Limpeza Urbana.

Este conjunto de dados é base para a elaboração do Plano que possui os seguintes componentes: Concepção, Desenvolvimento, Produtos, Plano de ação e Programas

A *concepção* de controle da drenagem urbana se baseia no seguinte:

- nos princípios de controle da drenagem urbana, apresentados;
- nas estratégias de desenvolvimento do plano como a compatibilidade entre os Planos preparados para a cidade. Este aspecto é destacado no item ;
- definição de cenários de desenvolvimento urbano e riscos para as inundações;
- padrões para as variáveis de controle da regulamentação.
- Viabilidade econômica das medidas

O desenvolvimento do Plano Diretor de Drenagem Urbana de cada bacia é feito segundo duas estratégias básicas: (a) legislação e sua regulamentação ou outras medidas não-estruturais para as áreas não ocupadas e ; (b) plano de controle dos impactos das inundações na drenagem para as bacias ocupadas ou áreas ocupadas.

Os *produtos* do Plano são a legislação, regulamentação ou outras medidas não estruturais, o Plano de controle de cada macrourbana da cidade e o manual de drenagem urbana, para orientar os profissionais quanto aos projetos de drenagem na cidade.

No *Plano de Ação* é definido o seguinte: Gestão da Implementaçãodo plano: envolve a definição das entidades que complementarão as ações pre-

vistas; Viabilidade Econômica, o mecanismo de funcionamento das implementações das ações do plano; sequenciamento de ações relacionadas com o plano de cada sub-bacia.

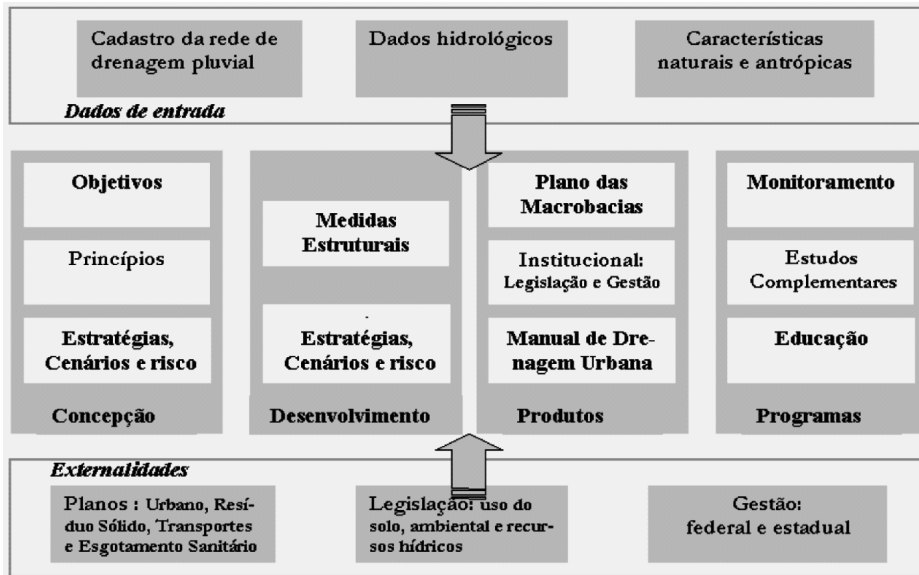



Figura 3.34 Desenvolvimento do Plano Diretor de Drenagem urbana

3.6.3 Plano de controle das macrobacias urbanas

Para as áreas que estão ocupadas deve-se desenvolver estudos específicos por macro-bacias urbanas visando planejar as medidas necessárias para o controle dos impactos dentro destas bacias, sem que as mesmas transfiram para jusante os impactos já existentes. O Plano de controle da drenagem urbana para cada macrobacia urbana contempla o seguinte:

(a) a avaliação da capacidade de drenagem existente;
(b) a identificação dos locais críticos, onde ocorrem inundações para o cenário atual para eventos com tempos de retorno escolhido;
(c) o estudo de alternativas para controle destas inundações;
(d) avaliação econômica;
(e) avaliação ambiental.

Avaliação ambiental

Com relação ao controle ambiental, caracterizado pela qualidade da água do escoamento pluvial, material sólido transportado pela drenagem e a contaminação da água subterrânea, as estratégias são as seguintes:

- Para as áreas onde não existe rede de esgoto cloacal ou existe grande quantidade de ligações de efluentes cloacais na rede pluvial, as medidas de controle priorizaram o controle quantitativo. Este tipo de medida utiliza a detenção apenas para o volume excedente da capacidade de drenagem atual, evitando que o escoamento em estiagem e o volume da primeira parte do hidrograma contamine as detenções. Estas áreas de armazenamento são mantidas a seco durante o ano e somente nos eventos com tempo de retorno acima de 2 anos são utilizadas. Em alguns casos é necessário utilizar estas áreas para riscos menores devido a baixa capacidade da rede existente.
- Quando a rede cloacal estiver implementada, o Plano no seu segundo estágio, pode ser implementado, modificando-se o sistema de escoamento junto as detenções para que as mesmas possam também contribuir para o controle da qualidade da água do pluvial.
- Para o controle da contaminação dos aqüíferos e o controle de material sólido deverão ser criados programas de médio prazo visando a redução desta contaminação através de medidas distribuídas pela cidade.

Avaliação econômica

A viabilidade econômica do Desenvolvimento das Medidas Estruturais e o Controle ao longo do tempo da drenagem urbana depende da capacidade econômica de implementação das medidas

Os custos relacionados com a drenagem urbana e controle de inundações das áreas urbanas abrangem:

- Custos de implementação das obras de macrodrenagem e outras medidas estruturais para controle dos impactos existentes na cidade. Estes custos estão distribuídos pelas bacias hidrográficas, através do Plano de cada bacia. Além disso, este custo ocorre quando da sua implementação;

- Custos de operação do sistema de drenagem existente da rede de pluvial, que envolve a limpeza, manutenção dos condutos e solução de problemas localizados. Este custo deve distribuído pelos usuários da rede de drenagem.

O princípio básico do financiamento das ações da drenagem urbana são o de distribuir os custos de acordo com as áreas impermeáveis não controladas da propriedade. Na drenagem urbana, quem aumenta o volume de escoamento superficial é responsável pelas inundações e deveria pagar pelo acréscimo do impacto. O fator fundamental do aumento do volume é a área impermeável. A distribuição dos custos da implantação da drenagem propostos no Plano pode ser baseada no seguinte:

Obras de controle: Para as obras de controle planejadas em cada bacia, os custos de sua implantação devem ser distribuídos dentro de cada bacia de acordo com a área impermeável de cada propriedade, a partir de uma taxa total cobrada pelo período estimado de implantação da mesma ou através de financiamento. Desta forma, a população das bacias onde a impermeabilização é maior e, portanto, com condições mais críticas de drenagem deverão pagar quantias maiores (veja anexo A para rateio de custos).

Operação e manutenção: O custo referente à operação e manutenção da rede de drenagem urbana pode ser cobrado: (a) como parte do orçamento geral do município, sem uma cobrança específica dos usuários; (b) através de uma taxa fixa para cada propriedade, sem distinção de área impermeável; (c) com base na área impermeável de cada propriedade. Esta última alternativa é a mais justa sobre vários aspectos, pois quem utiliza mais o sistema deve pagar proporcionalmente ao volume que gera de escoamento.

A principal dificuldade no processo de cobrança está na estimativa real da área impermeável de cada propriedade. Neste sentido, pode ser utilizado o seguinte procedimento:

- Utilizar a área construída de cada propriedade projetada para o plano da área do terreno como a área impermeável. Este valor não é o real , pois o espaço impermeabilizado tende a ser maior em função dos pavimentos.
- Estabelecer um programa de avaliação da área impermeável com base em imagem de satélite e verificação por amostragem através de visita local.

- Rateio dos custos deve considerar: Para cada bacia e para a cidade, a estimativa da área total impermeabilizada e o custo total da intervenção ou da operação e manutenção (veja anexo A).
- Cálculo do custo de operação e manutenção calculado com base no custo de operação total da cidade, pois as diferenças geográficas não são significativas e a separação de custo operacional por bacia é mais complexo. No anexo A é apresentada a metodologia de rateio de custo para as áreas não- controladas baseado no volume de escoamento gerado em cada superfície.

Cenários de desenvolvimento

Deve-se considerar dois aspectos quanto ao desenvolvimento urbano do plano: (a) cenários futuros ; (b) medidas de controle adotadas nos cenários. Os principais cenários identificados quanto ao desenvolvimento urbano podem ser:

I - Atual : Condições de urbanização atual, envolve a ocupação urbana no momento do desenvolvimento do Plano obtido de dados demográficos e imagens de satélite;
II - Cenário PDDU: Cenário previsto no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano. O plano de desenvolvimento urbano em vigor na cidade estabelece diferentes condicionantes de ocupação urbana para a cidade;
III - Cenário atual + PDDUA: Este cenário envolve a ocupação atual para as partes da bacia onde o Plano foi superado na sua previsão, enquanto que para as áreas em que o Plano não foi superado, foi considerado o valor de densificação previsto no mesmo;
IV - Cenário de ocupação máxima: Este cenário envolve a ocupação máxima de acordo com o que vem sendo observado em diferentes partes da cidade que se encontram neste estágio. Este cenário representa a situação que ocorrerá se o disciplinamento do solo não for obedecido.

O primeiro cenário citado no item anterior representa o estágio próximo do atual, o segundo é o cenário previsto pelo PDDU da cidade. O terceiro cenário representa a situação mais realista, pois aceita os desenvolvimento realizados fora do Plano Diretor e para o restante das áreas ainda em desenvolvimento o Plano previsto.

Quanto as medidas de controle adotadas em cada cenário de desenvolvimento urbano deve-se considerar o seguinte:

Cenário atual com as medidas de controle estruturais: corresponde à implementação das medidas estruturais em cada bacia, amortecendo as inundações, sem que sejam examinadas as conseqüências futuras da regulamentação no crescimento da cidade;
Cenário atual + PDDU com as medidas de controle estruturais: Este cenário corresponde a implementação das medidas estruturais baseadas no terceiro cenário de desenvolvimento urbano. Nesta situação, as intervenções admitem que as medidas de regulamentação não foram implementadas ou são condicionantes que permitem uma folga para o sistema de drenagem.

Risco de projeto

O risco de 10 anos de tempo de retorno geralmente é escolhido para dimensionamento da macrodrenagem. Este tempo de retorno representa um compromisso entre o custo das obras e a freqüência aceita para os prejuízos. Os maiores custos dos prejuízos das inundações encontram-se nas inundações com alto risco (baixo tempo de retorno), devido a sua grande freqüência de ocorrência. As obras de controle para riscos baixos (alto tempo de retorno) podem normalmente representam grandes custos, com benefício médio relativo baixo.

3.6.4 Aspectos Institucionais

Legislação para drenagem urbana

Os princípios da regulamentação proposta baseiam-se no controle na fonte do escoamento pluvial através do uso de dispositivos que amorteçam o escoamento das áreas impermeabilizadas e/ou recuperem a capacidade de infiltração através de dispositivos permeáveis ou pela drenagem em áreas de infiltração.

A legislação pode ser incluída diretamente no Plano Diretor Urbano ou através de decreto municipal. No anexo B é apresentado um exemplo de decreto municipal proposto para a cidade de Porto Alegre. Neste decreto são utilizados dois mecanismo: (a) o controle na fonte do escoamento urbano; (b) incentivar no decreto o uso de medidas na fonte. No decreto foi previsto um volume para cada lote que, quando totalmente impermealizado é razoavelmente grande. Para reduzir este volume o projetista pode utilizar de medidas na fonte.

Legislação para as áreas ribeirinhas: No caso de áreas ribeirinhas no Anexo C são apresentados exemplos de alguns artigos sobre o controle da área ribeirinha. Existem várias alternativas que depende da negociação dentro de cada cidade com a população. O importante é que para as áreas de riscos com restrição sejam encontrados mecanismos de compensação e valor econômico para a mesma.

Gestão de drenagem urbana

A grande maioria das cidades não tem definido uma entidade para controle e desenvolvimento da drenagem urbana. São poucas as cidade que possuem um departamento especializado. A drenagem pluvial apresenta várias interfaces gerenciais com: Planejamento Urbano, abastecimento de água, Esgotamento sanitário, Limpeza urbana, transporte e Meio ambiente.

Os planos tem sido realizados setorialmente como o de esgotamento sanitário e o de resíduo sólido. É essencial que as interfaces entre os mesmos sejam bem definidas, quando não forem desenvolvidos de forma integrada.

Como ações gerenciais recomenda-se o seguinte:

- A definição clara dentro da administração municipal sobre o escoamento pluvial;
- Plano de Ações de cada bacia seja desenvolvido com a participação efetiva dos órgãos que possuam atribuição com esgotamento sanitário e resíduo sólido. É importante que a limpeza das estruturas de drenagem tenham uma definição de atribuição;
- Programa de Manutenção das obras implementadas: considerando que as detenções distribuídas pela cidade serão locais de retenção de material sólido e podem ter interferência ambiental, recomenda-se que seja criado um grupo gerencial interdepartamental que será responsável pelas ações de: manutenção e recuperação.
- Aprovação de projetos: A avaliação dos projetos de drenagem deve ser executada por profissionais treinados dentro de nova concepção de controle da drenagem, possuindo capacidade de orientar soluções para os projetistas nesta fase de implantação do Plano;
- Fiscalização: A fiscalização também depende de profissionais treinados. Esta parte do processo é essencial para viabilizar a regulamentação na cidade.
- Educação: A educação deve ser vista dentro do seguinte: (a) forma-

ção de profissionais da entidade e de projetistas; (b) formação de projetistas de obra em geral: arquitetos e engenheiros; (c) divulgação a população essencial para o entendimento e apoio das medidas que atuam em drenagem urbana.

3.6.5 Programas

Os programas são os estudos complementares de médio e longo prazo que são recomendados no Plano visando melhorar as deficiências encontradas na elaboração do Plano desenvolvido. Os programas podem ser:

- Programa de monitoramento;
- Estudos complementares necessários ao aprimoramento do Plano;
- Manutenção;
- Fiscalização;

Monitoramento

O planejamento do controle quantitativo e qualitativo da drenagem urbana passa pelo conhecimento do comportamento dos processos relacionados com a drenagem pluvial. A quantidade de dados hidrológicos e ambientais é reduzida e o planejamento nesta etapa é realizado com base em informações secundárias, o que tende a apresentar maiores incertezas quanto a tomada de decisão na escolha de alternativas.

Este programa busca disponibilizar informações para a gestão do desenvolvimento urbano, articulando produtores e usuários e estabelecendo critérios que garantam a qualidade das informações produzidas.

O programa de monitoramento pode possuir os seguintes componentes:

- Monitoramento de bacias representativas da cidade;
- Avaliação e Monitoramento das áreas impermeáveis;
- Monitoramento de material sólido na drenagem;
- Completar o cadastro da drenagem da cidade.

Monitoramento de bacias representativas da cidade: Na cidade geralmente existem poucos dados hidrológicos. É necessário conhecer a variabilidade da precipitação na cidade, podem existir diferenças na tendência de precipitação em algumas áreas da cidade.

Para determinação das vazões nas bacias urbanas são utilizados modelos hidrológicos que possuem parâmetros que são estimados com base em dados observados de precipitação e vazão ou estimados através de informações de literatura. Os estudos geralmente utilizados no Plano estimam estes parâmetros com base em dados de outras regiões. Nas cidades geralmente não existem dados de qualidade da água dos pluviais. Estas informações são importantes para conhecer o nível de poluição resultante deste escoamento, as cargas dos diferentes componentes, visando estabelecer medidas de controle adequadas.

Os objetivos do programa são de aumentar a informação de precipitação, vazão, parâmetros de qualidade da água de algumas bacias representativas do desenvolvimento urbano e acompanhar qualquer alteração do seu comportamento frente ao planejamento previsto.

Para o desenvolvimento deste programa pode-se utilizar a seguinte seqüência metodológica :

- Levantamento de variáveis hidrológicas e de parâmetros de qualidade da água;
- Para os mesmos locais identificar os principais indicadores de ocupação urbana para os mesmos períodos dos dados coletados;
- Preparar um plano de complementação da rede existente;
- Criar um banco de dados para receber as informações existentes e coletadas;
- Implementar a rede prevista e torná-la operacional.

Avaliação e monitoramento de áreas impermeáveis: O desenvolvimento urbano da cidade é dinâmico, o monitoramento da densificação urbana é importante para avaliar o impacto sobre a infra-estrutura da cidade. Em estudos hidrológicos desenvolvidos nos últimos anos com dados de cidades brasileiras, incluindo São Paulo, Curitiba e Porto Alegre Campana e Tucci (1994) apresentaram uma relação bem definida entre a densificação urbana e as áreas impermeáveis. Portanto, o aumento da densificação tem relação direta com o aumento da impermeabilização do solo, que é a causa principal do aumento das vazões da drenagem pluvial.

Durante a realização do Plano é necessário fazer algumas adaptações das relações obtidas devido ao relevo muito acidentado da cidade, no entanto estas adaptações necessitam de verificação. Além disso, dentro do planejamento foram previstos cenários futuros de desenvolvimento. Consideran-

do que estes cenários podem se afastar da previsão é necessário acompanhar a alteração efetiva da impermeabilização nas bacias planejadas.

O objetivo é o de avaliar as relações de densidade habitacional e área impermeável da cidade e acompanhar a variação das áreas impermeáveis das bacias hidrográficas verificando alterações das condições de planejamento.

Este programa pode ser estabelecido com base no seguinte:

- Utilizando dados de campo e imagens estabelecer a relação de densidade habitacional e área impermeável para a cidade;
- Anualmente determinar para cada uma das bacias da cidade as áreas impermeáveis;
- Verificar se estão dentro dos cenários previstos no Plano;
- Sempre que houver novos levantamentos populacionais, atualizar a relação densidade x área impermeável. Ajustar esta relação para áreas comerciais e industriais.

Monitoramento de resíduos sólidos na drenagem: Existem grandes incertezas quanto à quantidade de material sólido que chega ao sistema de drenagem. A avaliação destas informações é muito limitada no Brasil. Geralmente, é conhecido a quantidade de material sólido coletado em cada área de coleta, mas não se conhece quanto efetivamente chega à drenagem. Os números podem chegar a diferenças de magnitude significativas.

Os estudos de drenagem urbana partem do princípios que um conduto tem capacidade de transportar a vazão que chega no seu trecho de montante e não é possível estimar quanto deste conduto estará entupido em função da produção de material sólido. Desta forma, muitos alagamentos que ocorrem são devidos, não à falta de capacidade projetada do conduto hidráulico, mas por causa de obstruções provocadas pelo material sólido. Para que seja possível atuar sobre este problema é necessário conhecer melhor como os componentes da produção e transporte deste material ocorrem em bacias urbanas.

O objetivo é de quantificar a quantidade de material sólido que chega à drenagem pluvial, como base para implantação de medidas mitigadoras.

Para quantificar os componentes que envolvem a produção e transporte do material sólido é necessário definir uma ou mais áreas de amostra. A metodologia prevista é a seguinte:

- Definir as metas de um programa de estimativa dos componentes do processo de geração e transporte de material sólido para a drenagem;
- Escolher uma ou mais áreas representativas para amostragem;
- Definir os componentes;
- Quantificar os componentes para as áreas amostradas por um período suficientemente representativo;
- Propor medidas mitigadoras para a redução dos entupimentos

Completar o cadastro do sistema de drenagem: O sistema de drenagem em geral não é totalmente cadastrado. Além disso, é necessário estabelecer um sistema de banco de dados que atualize todas as alterações que são realizadas na cidade, caso contrário a cada período de 2-4 anos são necessários outros levantamentos para atualização. O erro existente pode comprometer o dimensionamento das obras e o estudo de alternativas. Na fase de projeto, é essencial que o cadastro esteja adequadamente determinado.

O objetivo é o de levantar o cadastro de condutos pluviais da cidade e manter um banco de dados atualizado.

A metodologia consiste no seguinte:

- Levantamento do cadastro das áreas ainda sem as informações;
- Atualização do banco de dados;
- Estabelecer procedimentos administrativos para atualização do cadastro a cada nova obra executada na cidade.

Estudos complementares

Durante os estudos não foram identificadas necessidades complementares para aprimoramento do planejamento da drenagem urbana na cidade. Estes estudos buscam criar informações para a melhoria do futuro planejamento e projeto das águas pluviais na cidade.

Os estudos destacados são os seguintes:

- Revisão dos parâmetros hidrológicos;
- Metodologia para estimativa da qualidade da água pluvial;
- Dispositivos para retenção do material sólido nas detenções;
- Verificação das condições de projeto dos dispositivos de controle da fonte

Revisão dos parâmetros hidrológicos: O planejamento e o projeto das áreas estudadas geralmente utilizam o modelo SCS (Soil Conservation Service), que possui dois parâmetros básicos relacionados com a separação do escoamento e áreas impermeáveis e com o deslocamento do escoamento na bacia. Estes parâmetros que caracterizam a vazão máxima de um determinado local em função das características físicas do solo, cobertura e áreas impermeáveis.

A estimativa destes parâmetros são realizadas com base em dados existentes e limitados. Com a coleta de dados hidrológicos das bacias previstos no programa de monitoramento e aqueles que são implementados em programas recentes, será possível verificar a relação entre os parâmetros e as características das bacias, reduzindo as incertezas das estimativas.

O objetivo deste estudo é o de atualizar a relação entre os parâmetros do modelo utilizado e os tipos de solo, cobertura, características da drenagem e área impermeável.

As etapas da metodologia previstas são:

- Seleção dos eventos das bacias com dados disponíveis na cidade e do programa de monitoramento previsto;
- Determinação para a mesma época das características físicas da bacia;
- Determinação dos parâmetros com base nos dados observados de precipitação e vazão;
- Verificação das relações existentes e sua adaptação, caso seja necessário.

Metodologia para estimativa da qualidade da água pluvial : Não existe nenhuma metodologia de estimativa desenvolvida para a estimativa da qualidade de água pluvial com base em dados da realidade urbana brasileira. As estimativas são realizadas com base em dados de parâmetros de qualidade da água de cidades americanas ou européias com realidade de desenvolvimento diferente dos condicionantes brasileiros.

Considerando as limitações destacadas no item anterior, observa-se para se possa obter estimativas consistentes da qualidade da água da drenagem pluvial são necessários métodos que se baseiem em dados da realidade das bacias da cidade, dentro dos seus condicionantes urbanos.

Desenvolver metodologia para a estimativa da qualidade de água pluvial com base em dados de bacias. Os dados seriam os obtidos dentro do programa de monitoramento destacado no item anterior.

A metodologia proposta consiste no seguinte:

- ♦Análise e seleção dos dados de qualidade da água monitorados segundo programa do item anterior e outros obtidos dentro da cidade;
- ♦Avaliação da variabilidade temporal e espacial dos parâmetros de qualidade da água associados as práticas de limpeza urbana, sistema de saneamento e outros fatores que influenciam os parâmetros;
- ♦Definição de modelo e metodologia adequada para a estimativa em diferentes níveis da qualidade da água.

Verificação dos dispositivos de controle: Na literatura existem vários dispositivos de controle. A experiência de funcionamento destes dispositivos foi documentada em vários países. No entanto é necessário o desenvolvimento de experiência local. Estes elementos podem apresentar variações de comportamento de acordo com as características de uso, produção de material sólido, clima, entre outros fatores.

Na busca de maior eficiência quantitativa e ambiental do funcionamento dos dispositivos de controle da drenagem urbana é necessário que uma amostra dos mesmos sejam avaliados ao longo do tempo, para identificar o seu funcionamento e as correções potenciais de futuros projetos.

Os objetivos são de avaliar o funcionamento dos dispositivos de controle implantados na cidade com o advento deste Plano.

As etapas da metodologia propostas são:

- ♦Cadastrar todos os dispositivos de controle tais como: pavimento permeáveis, detenções e retenções e áreas de infiltração. Para este cadastro devem ser definidas as informações básicas para um banco de dados;
- ♦Por amostragem dos dispositivos existentes e pelo acompanhamento dos profissionais de fiscalização da Prefeitura, realizar anualmente uma avaliação da eficiência dos dispositivos. Neste caso, serão definidos os critérios de avaliação e os elementos a serem obtidos dos dispositivos selecionados.
- ♦Com base, em pelo uma amostra representativa e funcionamento de um período de 3 a 5 anos, serão preparadas recomendações com relação a construção dos dispositivos. Estas avaliações devem ser mantidas por um período que o projeto identifique que foram esgotados os aprimoramentos.

Programa de manutenção

O programa de manutenção é essencial para permitir que as obras previstas tornem-se efetivas ao longo do tempo. Neste sentido, como recomendado no capítulo anterior, a prefeitura deveria criar um grupo gerencial e manutenção das detenções construídas dentro das seguintes visões:

- Drenagem urbana;
- Controle dos resíduos sólidos;
- Proteção ambiental;
- Paisagismo e recreação urbana.

Ao longo tempo serão também construídas detenções privadas, que neste caso serão operadas pelos seus proprietários, mas a experiência dos Estados Unidos e França tem mostrado que com o passar do tempo o empreendedor privado não faz a manutenção e a tendência é que o poder público faça. Nesta situação, o custo é pago pelo empreendedor com o aumento da taxa operacional.

A falta de manutenção e retirada de material sólido das detenções pode implicar em: perda da eficiência, propagar doenças e deterioração ambiental.

O objetivo é de manter o sistema de drenagem operando de acordo com sua capacidade projetada ao longo do tempo.

A metodologia pode ser a seguinte:

- Criar um grupo gerencial para manutenção dos sistemas em construção no município;
- Treinar equipe de manutenção;
- Estabelecer programa preventivo de apoio relacionado com resíduos sólidos, com apoio comunitário;
- Programação das ações de limpeza das detenções nos períodos chuvosos;
- Sistematizar a quantificação do volume gerado e sua relação com programas preventivos.

Programa de educação

Educação técnica e da população : A falta de conhecimento quanto aos impactos da urbanização na drenagem é muito grande, tanto no ambiente

técnico como na população em geral. Isto dificulta a tomada de decisão num ambiente como a da cidade, onde a população participa diretamente das decisões de investimento da cidade. Além disso, os próprios profissionais de drenagem urbana necessitam de atualizar para implementação das medidas previstas no Plano.

A viabilização deste Plano depende de aceitação por parte da população e técnicos, independentemente da regulamentação. Portanto, é necessário que todos tenham as informações adequadas para que a gestão seja viável.

Os objetivos são de:

- ♦ Transmitir conceitos sobre o impacto da urbanização na drenagem urbana para população, engenheiros e arquitetos;
- ♦ Treinar técnicos da prefeitura e da iniciativa privada no projeto de técnicas de controle da drenagem urbana.

Os procedimentos podem ser

- ♦ Campanha de divulgação para a população através da mídia impressa e televisão;
- ♦ Palestras nas entidades de classe - arquitetos, engenheiros, construtores, etc;
- ♦ Palestras nas assembléias do orçamento participativo;
- ♦ Cursos de treinamento de curta duração para projetistas e técnicos da prefeitura sobre drenagem urbana.

Referências

APWA, 1969. *Water pollution aspects of urban runof.* Water Quality Administration.(Water Pollution Control Research Series. Report N. WP-20-15).

ASCE, 1985. *Stormwater Detention Outlet Control Structures.* Task Comitee on the Design of Outlet Structures. American Society of Civil Engineers, New York.

ASCE, 1992. *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. American Society of Civil Engeneer. 753p

AVCO, 1970. *Stormwater pollution from urban activity*. Water Quality Administration. (Water Pollution Control Research Series. Report n. 11034 FKL).

BOYD, M.J., 1981. Preliminary Design Procedures for Detention Basins. in: Second International Conference on Urban Drainage, Urbana, pp. 370 - 378. (Water Resources Publications).

BRAS, R. L.; PERKINS, F.E., 1975. Effects of urbanization on catchment response. *J. Hydr. Div. ASCE*, 101(HY3), 451-466

COLLISCHONN, W. TUCCI, C. E.M. 1998. Drenagem urbana e Controle de Erosão. VI Simpósio nacional de controle da erosão. 29/3 a 1/4 1998, Presidente Prudente, São Paulo.

COLSON, N.V., 1974. *Characterization ant treatment of urban land runoff*. EPA. 670/2-74-096.

EPA, 1985. *Methodology for analysis of detention basins for control of urban runoff quality*. Washington. (Environmental Protection Agency 440/5-87-001).

ESTADOS UNIDOS, Departament of tranportation, 1979. *Design of urban highway drainage*. Washington: Federal Highway Administration.

FUJITA, S., 1984. Experimental Sewer Systems for Reduction of Urban Storm Runoff. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3, 1984, Göteborg, *Proceedings*. Göterburg: Chalmers University of Technology, 4v. v3., p. 1211-1220.

FUJITA, S., 1993. Stormwater goes to ground as Japan chooses infiltration. *Water Quality International*. London, n.3, p. 18-19.

GUARULHOS, 2000. *Código de Obras do Município de Guarulhos* Lei 5617 de 9 de novembro de 2000, Mujnicípiuo de Guarulhos.

HOGLAND, W.; NIEMCZYNOWICZ, J., 1986. The unit Superstructure - A New Construction to prevent groundwater depletion. In: BUDAPEST SYMPOSIUM, 1986. Conjuntive Water Use: *Proceeedings*. Wallingford: IAHS. 547p. 512-522 (International Association of Hydrological Sciences. Publication n. 156)

HOLMSTRAND, O. 1984. Infiltration of Stormwater: research at Chalmers University of Technology. Results and examples of Application. In:

INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3, 1984, Göteborg. *proceedings*. Göteborg: chalmers University of Technology. 4v. v3, p1057-1066.

HOYT, W.G., LANGBEIN, W.B. 1955. *Floods*. Princeton: Princeton University Press, Princeton. 469p.

IBGE, 1998 "Anuário Estatístico do Brasil - 1997", Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1998 (CD-ROM)

IDE, C., 1984. *Qualidade da drenagem pluvial urbana*. Porto Alegre:UFRGS-Curso de Pós-Graduação em recursos Hídricos e Saneamento 137f. Dissertação(mestrado).

JACOBSEN, P.; HARREMOËS, P. 1981. Significance of Semi-Pervious Surfaces in Urban Hydrology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 2, 1981, Urbana. *Proceedings* Urbana: University of Illinois, v.1, p 424-433.

JOHNSON, W. 1978. *Physical and economic feasibility of nostrutural flood plain management measures*. Davis: Hydrologic Enginneer Center.

LARGER, J.ª; SMITH, W.G.; LYNARD, W.G.; FINN, R.M.; FINNEMORE, E.J. 1977 *Urban Stormwater management and technology: upadate and user's guide*. US EPA Report - 600/8-77-014 NTIS N. PB 275654.

LEOPOLD, L.B.,1968. *Hydrology for Urban Planning* - A Guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use. USGS circ. 554, 18p.

LLORET RAMOS, C.; HELOU, G. C. N.; BRIGHETTI, G. 1993 Dinâmica do transporte sólido nos rios Tietê e Pinheiros na região metropolitana de São Paulo. *Anais*. X Simpósio brasileiro de recursos hídricos. Gramado.

MOTTA, R.; REZENDE, L. 1999. The impact of sanitation on waterborne diseases on Brazil in: Peter H. May (org.) Natural Resource Valuation and Policy in Brazil: Methods and Cases pp 174-187 New York Columbia University Press.

NAKAE, T.; BRIGHETTI, G. 1993 Dragagem a longa distância aplicada ao desassoreamento da calha do rio Tietê. *Anais*. X Simpósio brasileiro de recursos hídricos. Gramado.

OLIVEIRA, M. G. B.; BAPTISTA, M. B. 1997 Análise da evolução temporal da produção de sedimentos na bacia hidrográfica da Pampulha e avaliação do assoreamento do reservatório. *Anais*. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH. Vitória.

PMBH, 1996 Plano Diretor Urbano. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.
PMPA, 2000. Segundo Plano de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre. Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

RAMOS, M.M.G. 1998 *Drenagem Urbana: Aspectos urbanísticos, legais e metodológicos em Belo Horizonte*. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais.

REZENDE, B. e TUCCI, C.E. M., 1979. *Análise hidráulica e hidrológica dos problemas de inundação urbana na cidade de Estrela, RS*. Relatório Técnico, p.29.

ROESNER, L.A; TRAINA, P. 1994. Overview of federal law and USEPA regulations for urban runoff. *Water Science & Technology* V29 n 1-2 p445-454

SCHUELLER, T. 1987. Controlling Urban Runoff : *A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs.*

SILVEIRA, A L. L., 1999. *Impactos Hidrológicos da urbanização em Porto Alegre*. 4o Seminário de Hidrologia Urbana e Drenagem. *Belo Horizonte ABRH.*

SIMONS, D.B. et al. 1977. *Flood flows, stages and damages*. Fort Collins: Colorado State University

SUDERSHA, 2002. Medidas não-estruturais. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba. CH2MHILL Engenharia do Brasil Lt.da

TASK, 1962. Guide for the development of flood plain regulation. *Journal of the Hydraulics Division*. *American Society of Civil Engineers*. New York, v.88, n.5, p.73-119,Sept.

TUCCI, C.E.M. 1993. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da UFRGS, ABRH, 952p.

TUCCI, C.E.M., 1998. *Modelos Hidrológicos*. ABRH Editora da Universidade, 652p.

TUCCI, C.E.M. 2000 a. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba Memorando n. 8. CHMHill / SUDHERSA.

TUCCI, C.E.M., GENZ, F., 1994. Medidas de controle de inundações in: Estudos Hidrossedimentológicos do Alto Paraguai, IPH/MMA.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. 2000. Storm hydrology and urban drainage. In: Tucci, C. Humid Tropics Urban Drainage, capítulo 4. UNESCO.

TUCCI, C. e SIMÕES LOPES, M. 1985. Zoneamento das áreas de inundação: rio Uruguai. R*evista Brasileira de Engenharia Caderno de Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, v.3, n. 1, p.19-45, maio.

URBONAS, B.; ROESNER, L.A., 1993. Hydrologic Design for Urban Drainage and Flood Control. In: *Handbook of Hydrology*. D.R. Maidment (ed.). Cap. 28.

URBONAS, B.; STAHRE, P., 1993. *Stormwater Best Management Practices and Detetion*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.

U. S. Army. Corps of Enginners. 1976. *Guidelines for flood damage reduction*. Sacramento.

VEN,F.H.M., 1990. Water Balances of Urban Areas. in: DUISBERG SYMPOSIUM, 1988. *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas*, IAHS , p21-32 International Association of Hydrological Sciences Publication 198).

YOSHIMOTO, T.; SUETSUGI, T., 1990. Comprehensive Flood Disaster Prevention Measures in Japan. in: DUISBERG SYMPOSIUM, 1988. *Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas*, IAHS , p175-183 International Association of Hydrological Sciences Publication 198).

WATER RESOURCES COUNCIL, 1971. *Regulation of flood hazard areas to reduce flood losses*. Washington.

WEIBEL, S.R., ANDERSON, R.J; WOODWARD,R.L.,1964. Urban Land Runoff as a factor in stream pollution. *Journal Water Pollution Control Federation*. Washington, V. 36, n.7, 914-924.

WILKEN, P., 1978 *Engenharia de drenagem superficial*. São paulo: CETESB

WRI, 1992. *World Resources 1992-1993*. New York: Oxford University Press. 385p.

WRIGHT, A M. 1997 'Toward a Strategic Sanitation Approach: Improving the sustentatibility of urban Sanitation in Developing Countries'. UNDP - World Bank 38p.

ANEXO A

A1 Rateio dos custos de operação e manutenção da rede

O custo unitário uniforme seria

$$C_u = \frac{Ct}{Ab} \ (R\$/m^2) \tag{A1}$$

onde Ab é a área da bacia em km^2 e Ct, custo total em R$ milhões

A área da bacia pode ser sub-dividida em

$$100 = Ap + Ai \tag{A2}$$

para Ap, parcela de áreas permeáveis (%); Ai, parcela de áreas impermeáveis (%).

Numa área urbana as áreas impermeáveis podem ser desdobradas na expressão

$$Ai = \alpha.i + \beta.i_l \tag{A3}$$

onde (é a parcela da área com arruamentos e logradouros públicos, como parques e praças; i_m é a parcela impermeável desta área (%); β é a parcela da área ocupada pelos lotes urbanos; i_l é a parcela de impermeabilização do lote. Neste caso, $\beta = 1 - \alpha$. A equação acima fica

$$Ai = \alpha.i_m + (1 - \alpha)i_l \tag{A4}$$

O valor de α usualmente varia de 0,25 a 0,35 da área loteada. Conside-

rando $\alpha = 0{,}25$, distribuindo 15% para ruas e 10% para praças, sendo que como as ruas possuem 100% de áreas impermeáveis e as praças próximo de zero, resulta para

$$i_m = (0{,}15 \times 100 + 0 \times 0{,}10)/0{,}25 = 60\%$$

A equação A4 fica

$$Ai = 15 + 0{,}75.i_l \quad (A5)$$

O princípio da taxa de cobrança da operação e manutenção da drenagem urbana é o da proporcionalidade com relação ao volume de escoamento superficial gerado. Considerando que as áreas impermeáveis possuem coeficiente de escoamento 0,95 e as áreas permeáveis 0,15 (Cp=0,15 e Ci = 0,95), o volume gerado pelas áreas impermeáveis é 6,33 superior ao das áreas permeáveis. Desta forma o custo unitário de uma área permeável é

$$Cu_p = \frac{0.95}{0{,}15} Cu_i = 6{,}33 Cu_i \quad (A6)$$

onde o Cu_i é o custo unitário das áreas impermeáveis O custo total da operação e manutenção é igual

$$Ct = \frac{Ab}{100} [Cu_p . A_p + Cu_i . A_i] \quad (A7)$$

Utilizando as equações A2 e A6 na equação A7, resulta

$$Ct = \frac{Ab.Cu_i}{100} (15{,}8 + 0{,}842.A_i) \quad (A8)$$

O custo unitário das áreas impermeáveis fica

$$Cu_i = \frac{100.Ct}{Ab.(15{,}8 + 0{,}842.Ai)} \quad (A9)$$

onde, Cu_i em R$/m^2, para Ct em milhões; Ab em km^2 . Conhecidos os valores de Ct, Ab e Ai da bacia total. O valor de Cui é fixado para a bacia ou para área total em questão.

O cálculo do custo a ser pago por propriedade fica

$$Tx = \frac{A}{100} .(Cui. Ai + Cup.Ap) \quad (A10)$$

e

$$Tx = \frac{A}{100}.[Cu_i A_i + 0{,}158Cu_i . (100 - A_i)]$$

$$Tx = \frac{A.Cu_i}{100}(15{,}8 + 0{,}842.\ A_i) \quad (A11)$$

onde A é a área da propriedade em m^2 e Ai é a área impermeável da área A em %. A expressão de Ai pode ser obtida da equação 5, substituindo na equação 11 fica

$$Tx = \frac{A.Cu_i}{100}(28{,}43 + 0{,}632i_1) \quad (A12)$$

Para verificar a coerência desta equação, considere uma bacia onde a área impermeável total é de 40%. Para que a área total da bacia tenha 40% de áreas impermeáveis, a área impermeável dos lotes terá i_1 = 33,33 % e considerando A = Ab, utilizando as equações 11 e 12, deve-se obter Tx = Ct.

Tabela A1 Exemplo do rateio de custo baseado na área impermeável do lote

Área impermeável %	Taxa anual para um terreno de 300 m² R$
5	26,86
10	29,59
20	35,04
30	40,49
40	45,94
50	51,39
60	56,84
70	62,29
80	67,74

Para exemplificar, considere o custo de R$ 1.400,00/ha, numa bacia de 40% de área impermeável, o custo de manutenção de um lote de 300 m^2 é obtido utilizando inicialmente a equação A8,

$$Cu_i = \frac{100x0{,}14}{1x(15{,}8 + 0{,}842x40)} = R\$\ 0{,}283/m^2$$

$$Cup = 0,283/6,33 = R\$ \ 0,045/m^2$$

Na equação A.11, resulta

$$Tx = \frac{300x0,283}{100}(28,43 + 0,642i_1) = 24,137\ b + +0,545.i_1$$

Na tabela anterior são apresentados os valores deste caso.

A2. Rateio dos custos para implementação das obras do Plano de Drenagem

Neste caso, o rateio de custos é distribuído apenas para as áreas impermeabilizadas, que aumentaram a vazão acima das condições naturais. Neste caso, a equação A1 fica

$$Cup_i = \frac{Ctp.100}{A_b\ .\ A_i} \qquad (A13)$$

onde Ctp é o custo total de implementação do Plano.

O custo para cada área de lote urbanizado de i1 % é obtida pela expressão

$$Txp = \frac{Ai.Cup_i\ .A}{100} \qquad (A14)$$

onde Ai é a distribuição das áreas impermeáveis em cada área, dada pela equação 5, o que resulta

$$Txp = (15+0,75i_1)Cup_i\ \frac{A}{100} \qquad (A.15)$$

Substituindo a equação A13 resulta

$$Txp = \frac{A.Ctp.(15 + 0,75i_1)}{A_b\ .\ A_i} \qquad (A16)$$

onde, como anteriormente, Ai é a área impermeável de toda a bacia em %; A é a área do terreno em m^2; Ab é a área da bacia em km^2; Ctp é o custo total em R$ milhões; i_1 é a área impermeável do lote em %.

Para um lote sem área impermeável, a contribuição tarifária do pro-

prietário se refere a parcela comum das ruas e fica

$$Txp = \frac{15.A.Ctp}{A_b \, . \, A_i} \qquad (A17)$$

Considere uma bacia que necessita R$ 3 milhões de investimentos para o Plano Diretor. A área impermeável é de 40% e a área da bacia de 5 km². A taxa a ser paga para um terreno de 300 m² para implantação das medidas na bacia é obtida por

$$Txp = \frac{300x3}{5x40}(15 + 0{,}75i_1) = 67{,}5 + 3{,}375.\ i_1 \qquad A18)$$

Na tabela abaixo são apresentados os valores de acordo com a área impermeável do lote.

Área impermeável %	Tx R$
0	67,50
10	101,25
20	135,00
30	168,75
40	202,50
50	236,25
60	270,00
70	303,75
80	337,50

Tabela A2 Taxa para implementação do Plano Diretor da bacia para um lote de 300 m²

ANEXO B

Decreto de regulamentação municipal para controle da drenagem urbana proposto para Porto Alegre RS Brasil

DECRETO N º, DE
DE
Regulamenta o controle da drenagem urbana

O Prefeito Municipal de Porto Alegre, usando de suas atribuições legais e tendo em vista os Art. 97 e Art. 135 § 6o da Lei Complementar 434/99 e considerando que:

- compete ao poder público prevenir o aumento das inundações devido à impermeabilização do solo e canalização dos arroios naturais;
- o impacto resultante da impermeabilização produz aumento de freqüência de inundações, piora da qualidade da água e aumento do transporte de material sólido, degradando o ambiente urbano;
- deve ser responsabilidade de cada empreendedor a manutenção das condições prévias de inundação nos arroios da cidade, evitando-se a transferência para o restante da população do ônus da compatibilização da drenagem urbana;
- a preservação da capacidade de infiltração das bacias urbanas é prioridade para a conservação ambiental dos arroios e rios que compõem a macrodrenagem e dos rios receptores do escoamento da cidade de Porto Alegre.

Declara que:

Art. 1º Toda ocupação que resulte em superfície impermeável, deverá possuir uma vazão máxima específica de saída para a rede pública de pluviais menor ou igual a 20,8 l/(s.ha).

§ 1º A vazão máxima de saída é calculada multiplicando-se a vazão específica pela área total do terreno.

§ 2º Serão consideradas áreas impermeáveis todas as superfícies que não permitam a infiltração da água para o subsolo.

§ 3º A água precipitada sobre o terreno não pode ser drenada diretamente para ruas, sarjetas e/ou redes de drenagem excetuando-se o previsto no § 4o deste artigo.

§ 4º As áreas de recuo mantidas como áreas verdes poderão ser drenadas diretamente para o sistema de drenagem.

§ 5º Para terrenos com área inferior a 600 m2 e para habitações unifamiliares, a limitação de vazão referida no caput deste artigo poderá ser desconsiderada, a critério do Departamento de Esgoto Pluviais.

Art. 2º Todo parcelamento do solo deverá prever na sua implantação o limite de vazão máxima específica disposto no Art. 1º .

Art. 3º A comprovação da manutenção das condições de pré-ocupação no lote ou no parcelamento do solo deve ser apresentada ao DEP (Departamento de Esgoto Pluviais).

§ 1º Para terrenos com área inferior a 100 (cem) hectares quando o controle adotado pelo empreendedor for o reservatório, o volume necessário do reservatório deve ser determinado através da equação:

$$v = 4{,}25\ AI$$

onde v é o volume por unidade de área de terreno em m^3/hectare e AI é a área impermeável do terreno em %.

§ 2º O volume de reservação necessário para áreas superiores a 100 (cem) hectares deve ser determinado através de estudo hidrológico específico, com precipitação de projeto com probabilidade de ocorrência de 10% em qualquer ano (Tempo de retorno = 10(dez) anos).

§ 3º Poderá ser reduzida a quantidade de área a ser computada no cálculo referido no §1º se for (em) aplicada(s) a(s) seguinte(s) ação (ões):

- Aplicação de pavimentos permeáveis (blocos vazados com preenchimento de areia ou grama, asfalto poroso, concreto poroso) - reduzir em 50% a área que utiliza estes pavimentos;

- Desconexão das calhas de telhado para superfícies permeáveis com drenagem - reduzir em 40% a área de telhado drenada;
- Desconexão das calhas de telhado para superfícies permeáveis sem drenagem - reduzir em 80% a área de telhado drenada;
- Aplicação de trincheiras de infiltração - reduzir em 80% as áreas drenadas para as trincheiras.

§ 4º A aplicação das estruturas listadas no § 3º estará sujeita a autorização do DEP, após a devida avaliação das condições mínimas de infiltração do solo no local de implantação do empreendimento, a serem declaradas e comprovadas pelo interessado.

§ 5º As regras de dimensionamento e construção para as estruturas listadas no § 3º bem como para os reservatórios deverão ser obtidas no Manual de Drenagem Urbana do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre.

Art. 4º Após a aprovação do projeto de drenagem pluvial da edificação ou do parcelamento por parte do DEP, é vedada qualquer impermeabilização adicional de superfície.

Parágrafo Único: A impermeabilização poderá ser realizada se houver retenção do volume adicional gerado de acordo com a equação do Art. 3º §1º.

Art. 5º Os casos omissos no presente decreto deverão ser objeto de análise técnica do Departamento de Esgotos Pluviais.

Art.6º Este decreto entrará em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário.

ANEXO C

Elementos para regulamentação das áreas de risco de inundação ribeirinha

São apresentados a seguir sugestões de elementos de controle das áreas de risco que podem ser introduzidos dentro do anteprojeto de lei de

zoneamento do uso e ocupação do solo urbano. Utilizou-se como base as legislações existentes de zoneamento nos municípioos, introduzindo a complementação sobre zoenamento de áreas de risco de inundação.

Art. 3º Para o efeito de aplicação da presente lei, são adotadas as seguintes definições:
....
Parágrafo 4 º- Dos termos gerais
....
l) área de risco de inundação: *é a área com cota igual ou inferior a cota (a definir), denominado aqui de NM.*

Art. 9º A permissão para a localização de qualquer atividade considerada como perigosa, nociva ou incômoda, dependerá da aprovação do projeto completo, se for o caso, pelos órgãos competentes da União, do Estado e Município, além das exigências especificas de cada caso.

Parágrafo Único: ......
....

g) armazenagem ou processamento, nas áreas de risco de inundação, de material que misturado com a água seja prejudicial a saúde humana.

Art. 11º Para a instalação de obra ou atividade, potencialmente geradora de grandes modificações no espaço urbano, poderá ser exigido o Relatório de Impacto de Vizinhança, no seguinte caso:

I - edificações com área computável, para cálculo do coeficiente de aproveitamento, superior a 10.000 m^2 (dez mil metros quadrados).
....
Parágrafo 4º No projeto de urbanização da área mencionada em I, a vazão máxima de saída da drenagem pluvial, deverá ser menor ou igual a vazão proveniente dessa área, antes da urbanização.

Art 14ºFica determinada a Zona Central como correspondente à área central e seu entorno, definida pelos níveis da cota de enchente da *cheia NM*

Art 15º Fica determinada a Zona de Baixa Densidade como correspondente à área situada entre as cotas de enchente (a definir) me (a definir) m.

Parágrafo Único - Para esta zona, ficam estabelecidos os seguintes objetivos e instrumentos:

.....

g) retirar o imposto para os imóveis com os seguintes usos: agrícola, parques ou praças privados; áreas esportivas; estacionamento; áreas de carregamento; áreas de armazenamento de material facilmente removível ou não sujeitos a danos de enchentes.

Inserir um artigo depois do art. 22, denominado aqui de art. 22'

Art 22' Todos os projetos de construções localizadas na áreas de risco de inundação devem ser fiscalizados quanto ao seguinte:

a) estabelecimento de, pelo menos, um piso com nível superior N8M (cota da cheia máxima);
b) uso de materiais resistentes à submersão ou contato com a água;
c) equipamentos elétricos em cota acima da cota N83. Prever o desligamento do sistema de alimentação durante o período de cheia;
d) proteção dos aterros contra erosões;
e) prever os efeitos das enchentes nos projetos de esgotos pluvial e cloacal;
f) estruturalmente, as construções devem ser projetadas para resistir a: (i) pressão hidrostática, que pode causar problemas de vazamento; (ii) empuxos e momentos; (iii) erosão.
g) fechamento de aberturas como portas, janelas e dispositivos de ventilação quando é desejado proteger o piso submetido a inundação;
h) estanqueidade e reforço das paredes de porões e pisos sujeito a inundação;
i) ancoragem de paredes contra deslizamentos;
j) para os pisos previstos que inundem, prever o escoamento através da obra, evitando o desmoronamento de paredes;
k) prever o transporte de material de valor para pisos superiores e a habitação por até três meses nos pisos superiores.